



**Ga KATKILI Ge TEK KRİSTALLERİNİN CZOCHRALSKI TEKNİĞİ İLE  
BÜYÜTÜLMESİ ve pn-EKLEM Ge DİLİM GELİŞTİRİLMESİ**

**Veysel BARAN**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2020**

Veysel BARAN tarafından hazırlanan “Ga KATKILI Ge TEK KRİSTALLERİNİN CZOCHRALSKI TEKNİĞİ İLE BÜYÜTÜLMESİ ve pn-EKLEM Ge DİLİM GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi FİZİK Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Başkan:** Prof. Dr. Abdullah CEYLAN

Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Bora ALKAN

Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

**Üye:** Prof. Dr. Mustafa KEMAL ÖZTÜRK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ....

Tez Savunma Tarihi: 22/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Cevriye GENCER  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarımı kabullendiğimi beyan ederim.

.....  
Veysel BARAN  
22/09/2020

Ga KATKILI Ge TEK KRİSTALLERİNİN CZOCHRALSKI TEKNİĞİ İLE  
BÜYÜTÜLMESİ ve pn-EKLEM Ge DİLİM GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Veysel BARAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Germanyum (Ge) güneş hücresinin performans parametreleri [kısa-devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ), açık-devre gerilimi ( $V_{OC}$ ), dolum faktörü ( $FF$ ) ve enerji dönüşüm verimi ( $\eta$ )] üzerinde sıcaklığın etkisi teorik olarak araştırıldı. Artan sıcaklıkla kısa-devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$ 'nin artmasına rağmen; açık-devre gerilimi  $V_{OC}$ 'deki azalma ve dolum faktörü  $FF$ 'deki ilişkili azalma nedeniyle enerji dönüşüm verimi  $\eta$  azaldı. Ge güneş hücresi fabrikasyon işleminde kullanmak için, alttaş üretimi gerçekleştirildi. Czochralski (Cz) hacimli tek-kristal büyütme tekniği kullanılarak; Galyum (Ga) katkılı Ge tek-kristal külçesi büyütüldü. Büyütülen tek-kristal külçeden üretilen p-tipi Ge numunelerinden bir tanesinin alttaş olarak kullanıldığı bir Ge güneş hücresi fabrikasyon işlemi gerçekleştirildi. Üretilen Ge güneş hücresinin performans parametreleri  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$ , akım-gerilim ( $I-V$ ) ölçümlerinden belirlendi. Bu tez kapsamında;  $III-V$  grubu bileşik yarıiletken çok eklemli güneş hücreleri için oldukça önemli rollere sahip olan, Ge tek-kristal külçenin büyütülmesinden Ge güneş hücresinin üretilmesine kadar gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçların, teknolojik bilgi birikiminin gelişimine katkı sağlama açısından değerli olduğu ifade edilebilir.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : Czochralski, Ge, güneş hücresi, sıcaklık, hücre performansı

Sayfa Adedi : 97

Danışman : Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK

THE GROWTH OF Ga DOPED Ge SINGLE CRYSTALS BY CZOCHRALSKI  
TECHNIQUE and DEVELOPMENT OF pn-JUNCTION Ge WAFER

(Ph. D. Thesis)

Veysel BARAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

The effect of temperature on the performance parameters [short-circuit current density ( $J_{SC}$ ), open-circuit voltage ( $V_{OC}$ ), fill factor ( $FF$ ) and energy conversion efficiency ( $\eta$ )] of germanium (Ge) solar cell was theoretically investigated. Although the short-circuit current density  $J_{SC}$  increased with increasing temperature; the energy conversion efficiency  $\eta$  decreased due to decrease in the open-circuit voltage  $V_{OC}$  and the associated decrease in the fill factor  $FF$ . The production of substrate was carried out to use in the fabrication process of Ge solar cell. Gallium (Ga) doped Ge single-crystal ingot was grown by using Czochralski (Cz) bulk single-crystal growth technique. The fabrication process of a Ge solar cell, in which one of p-type Ge samples produced from the grown single-crystal ingot was used as substrate, was carried out. The performance parameters  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  and  $\eta$  of fabricated Ge solar cell were determined from current-voltage ( $I$ - $V$ ) measurements. Within the scope of this thesis; it can be expressed that the carried out studies and the obtained results from the growth of Ge single-crystal ingot to the production of Ge solar cell, which have quite important roles for  $III$ - $V$  group compound semiconductor multijunction solar cells, are valuable in terms of contributing to the development of technological knowledge.

Science Code : 20227

Key Words : Czochralski, Ge, solar cell, temperature, cell performance

Page Number : 97

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet CAKMAK

## TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim-öğretim hayatım boyunca her türlü bilgi birikimi ve tecrübeleriyle bugünlere ulaşmamda büyük emek harcayan, müdürlük görevini sürdürdüğü Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi altyapısının sunduğu her türlü imkândan faydalanmamı sağlayan saygı değer büyüğüm ve Hocam, Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkürü bir borç bilirim. Bugünlere ulaşmamda büyük emeği olan bir başka saygı değer büyüğüm ve Hocam, Prof. Dr. Mehmet KASAP'a şükranlarımı sunarım. Saygı değer büyüğüm ve Danışman Hocam, Prof. Dr. Mehmet ÇAKMAK'a her türlü desteği nedeniyle teşekkür ederim.

Gazi Üniversitesi öğretim üyesi, saygı değer büyüğüm ve Hocam, Prof. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK'e, Gazi Üniversitesi öğretim üyesi, saygı değer büyüğüm ve Hocam, Doç Dr. Tarık ASAR'a ve Gazi Üniversitesi'nde görev yapmakta olan saygı değer büyüğüm ve Hocam, Öğr. Gör. Dr. Yunus ÖZEN'e her türlü bilgi birikimi ve tecrübelerinden yararlanmamı sağladıklarından dolayı şükranlarımı sunarım.

Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bugüne kadar birlikte çalıştığım bütün arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak; Annem, canım, her şeyim... Benim için yaptığın her şey için çok ama çok teşekkür ederim. Sağlık problemlerin nedeniyle geçirdiğin bu zor günlerin bir an evvel bitmesi dileğimle; Mevlam başımdan eksik etmesin seni...

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) - 1005 programı kapsamında 115F048 nolu proje ile TÜBİTAK ve 2016K121220 nolu proje ile Türkiye Cumhuriyeti (T.C.) Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. CZOCHRALSKI (CZ) TEK-KRİSTAL BÜYÜTME TEKNİĞİ .....	7
3. GÜNEŞ HÜCRESİ .....	13
3.1. Hava Kütlesi (Air Mass-AM).....	13
3.2. Fotovoltaik (PV) Fiziği .....	17
3.3. Güneş Hücresi Çalışma Prensibi .....	18
4. ANALİTİK GÜNEŞ HÜCRE MODELİ.....	21
4.1. Soğurma Katsayısı .....	22
4.2. Yansıma.....	23
4.3. Kısa Devre Akım Yoğunluğu.....	23
4.4. Karanlık Akım Yoğunluğu.....	27
4.5. Kısa Devre Akım Yoğunluğu-Gerilim ( $J$ - $V$ ) Karakteristiği.....	28
4.6. Sıcaklık Etkisi .....	34
5. TEORİK ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	37

	<b>Sayfa</b>
5.1. Güneş Hücresi Çalışma Sıcaklığı.....	37
5.2. Teorik Sonuçlar ve Tartışma.....	38
<b>6. KARAKTERİZASYON ANALİZ SİSTEMLERİ .....</b>	<b>45</b>
6.1. X-Işını Kırınım (XRD) Sistemi.....	45
6.2. Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM) Sistemi.....	46
6.3. Hall Etkisi Sistemi.....	47
6.4. İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) Sistemi .....	47
6.5. Akım-Gerilim ( <i>I-V</i> ) Ölçüm Sistemi .....	48
<b>7. ALTTAŞ ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONLAR .....</b>	<b>51</b>
7.1. Alttaş Üretimi.....	51
7.1.1. Galyum katkılı Germanyum tek-kristal külçenin büyütülmesi.....	51
7.1.2. Tek-kristal külçenin dilimlenmesi.....	57
7.1.3. Dilimin leplenmesi ve parlatılması .....	60
7.2. Karakterizasyonlar .....	64
7.2.1. XRD analiz sonuçları .....	64
7.2.2. AFM analiz sonuçları.....	65
7.2.3. Özdirenç ve Hall etkisi analiz sonuçları.....	67
<b>8. GERMANİYUM (Ge) GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ: ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>69</b>
8.1. Germanyum (Ge) Güneş Hücresi.....	69
8.2. Germanyum (Ge) Güneş Hücresi Üretimi .....	71
8.2.1. Yayıcı difüzyonu.....	72
8.2.2. Arka kontak ve arka yüzey alanı (BSF) .....	73
8.2.3. Mesa aşındırma .....	76

	<b>Sayfa</b>
8.2.4. Ön kontak metalizasyonu .....	76
8.3. Akım-Gerilim ( <i>I-V</i> ) Analiz Sonuçları .....	78
9. SONUÇLAR.....	83
KAYNAKLAR .....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	95

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Analitik modelde içerilen temel parametreler [43] .....	25
Çizelge 5.1. 200 K, 300 K, 400 K sıcaklıkta hesaplanmış güneş hücre parametreleri ...	39
Çizelge 7.1. Dilimin yapısal karakterizasyon sonuçları .....	64
Çizelge 7.2. Her bir yüzey alanı için elde edilen RMS değerleri .....	67
Çizelge 7.3. Alttaşın elektriksel karakterizasyon sonuçları .....	67
Çizelge 8.1. Teorik ve deneysel olarak elde edilen performans parametreleri .....	81

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Cz sürecinin farklı adımlarının şematik gösterimi [44] .....	12
Şekil 3.1. Spektral ışınma spektrumları ve atmosferik soğurma bantları [56,58] .....	13
Şekil 3.2. (a) Hava kütlesi durumları, (b) Hava kütlelerinin şematik tanımı ve (c) Doğrudan ve saçılarak yeryüzüne ulaşan ışınların gösterimi [56] .....	14
Şekil 3.3. Standart referans spektrumları [59].....	16
Şekil 3.4. AM1,5G standart referans spektrumu ve Ge yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığının güneş spektrumundaki pozisyonu [60] .....	17
Şekil 4.1. Foton enerjisine bağlı olarak bazı yarıiletken malzemelerin soğurma katsayıları [56] .....	22
Şekil 4.2. Tek eklemli bir güneş hücresinin şematik gösterimi [43].....	23
Şekil 4.3. Karanlık ve aydınlatma altında <i>I-V</i> karakteristikleri [79] .....	31
Şekil 5.1. Ge güneş hücresinin sıcaklık bağımlı <i>J-V</i> eğrileri .....	39
Şekil 5.2. Ge güneş hücresinin sıcaklık bağımlı dolum faktörü.....	42
Şekil 5.3. Ge güneş hücresinin sıcaklık bağımlı enerji dönüşüm verimi .....	43
Şekil 7.1. Elde edilen dilimin X-ışını kırınım deseni.....	65
Şekil 7.2. Alttaşın $3 \times 3 \mu m^2$ , $5 \times 5 \mu m^2$ ve $10 \times 10 \mu m^2$ 'lik yüzey alanlarında taranan 3D AFM görüntüleri .....	66
Şekil 8.1. Fosfor-difüzyonlu p-tipi Ge numunelerin SIMS ölçüm sonuçları .....	73
Şekil 8.2. Üretilen Ge güneş hücresinin şematik gösterimi .....	78
Şekil 8.3. Üretilen Ge güneş hücresinin <i>J-V</i> eğrisi .....	80

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 6.1. Yüksek çözünürlüklü XRD sistemi (Gazi Fotonik).....	45
Resim 6.2. AFM sistemi (Gazi Fotonik).....	46
Resim 6.3. Hall etkisi sistemi (Gazi Fotonik).....	47
Resim 6.4. SIMS sistemi (Gazi Fotonik).....	48
Resim 6.5. <i>I-V</i> ölçüm sistemi (Gazi Fotonik).....	49
Resim 7.1. Cz hacimli tek-kristal büyütme sistemi (Gazi Fotonik).....	52
Resim 7.2. İşlem haznesinde bulunan parçaların görüntüleri (Gazi Fotonik).....	54
Resim 7.3. Elmas tel testere sistemi (Gazi Fotonik).....	59
Resim 7.4. Lepleme ve parlatma sistemi (Gazi Fotonik).....	61
Resim 7.5. Dilim alttaş bağlama ünitesi (Gazi Fotonik).....	63
Resim 7.6. Elde edilen ürünlerden bazılarının görüntüleri.....	63
Resim 8.1. Maske hizalama sistemi (Gazi Fotonik).....	74
Resim 8.2. Buharlaştırma sistemi (Gazi Fotonik).....	75
Resim 8.3. Buharlaştırma sistemi (Gazi Fotonik).....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>A</b>	Amper
<b>A</b>	Güneş Hücresi Alanı
<b>Ag</b>	Gümüş
<b>Al</b>	Alüminyum
<b>Ar</b>	Argon
<b>As</b>	Arsenik
<b>Au</b>	Altın
<b>B</b>	Işımalı Rekombinasyon Katsayısı
<b>B</b>	Bor
<b>c</b>	Işık hızı
<b>cm</b>	Santimetre
<b>Cr</b>	Krom
<b>Cs</b>	Sezyum
<b>Cu</b>	Bakır
<b><math>d_b</math></b>	Taban Tabaka Kalınlığı
<b><math>d_e</math></b>	Yayıcı Tabaka Kalınlığı
<b><math>D_n</math></b>	Taban Tabakadaki Elektron Difüzyon Katsayısı
<b><math>D_p</math></b>	Yayıcı Tabakadaki Hol Difüzyon Katsayısı
<b>E</b>	Foton Enerjisi
<b><math>E_C</math></b>	İletkenlik Bandının En Alt Seviyesi
<b><math>E_g</math></b>	Yarıiletken Malzemenin Enerji-Bant Aralığı
<b><math>E_v</math></b>	Valans Bandının En Üst Seviyesi
<b>FF</b>	Dolum Faktörü
<b>g</b>	Gram
<b>G</b>	Taşıyıcı Üretim Fonksiyonu
<b>G</b>	Radyasyon Yoğunluğu

**Simgeler****Açıklamalar**

<b>Ga</b>	Galyum
<b>Ge</b>	Germanyum
<b>h</b>	Planck sabiti
<b>H</b>	Hidrojen
<b>I</b>	Akım
<b>I<sub>L</sub></b>	Fotoakım
<b>I<sub>m</sub></b>	Maksimum Akım
<b>I<sub>SC</sub></b>	Kısa Devre Akımı
<b>I<sub>0</sub></b>	Ters Doyum Akımı
<b>I<sub>λ</sub></b>	Spektral Parlaklık
<b>In</b>	İndiyum
<b>J<sub>k</sub></b>	Karanlık Akım Yoğunluğu
<b>J<sub>SC</sub></b>	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
<b>J<sub>SCBλ</sub></b>	Taban Tabaka Spektral Kısa Devre Akım Yoğunluğu
<b>J<sub>SCEλ</sub></b>	Yayıcı Tabaka Spektral Kısa Devre Akım Yoğunluğu
<b>J<sub>0</sub></b>	Ters Doyum Akım Yoğunluğu
<b>J<sub>0B</sub></b>	Taban Tabaka Ters Doyum Akım Yoğunluğu
<b>J<sub>0E</sub></b>	Yayıcı Tabaka Ters Doyum Akım Yoğunluğu
<b>k<sub>B</sub></b>	Boltzman Sabiti
<b>K</b>	Kelvin
<b>l</b>	Atmosferde Alınan Yol Uzunluğu
<b>l</b>	Litre
<b>l<sub>0</sub></b>	Atmosfer Kalınlığı
<b>L</b>	Soğurma Uzunluğu
<b>L<sub>n</sub></b>	Taban Tabakadaki Elektron Difüzyon Uzunluğu
<b>L<sub>p</sub></b>	Yayıcı Tabakadaki Hol Difüzyon Uzunluğu
<b>m</b>	Metre
<b>mbar</b>	Milibar
<b>m<sub>e</sub><sup>*</sup></b>	Elektron Etkin Kütlesi
<b>m<sub>h</sub><sup>*</sup></b>	Hol Etkin Kütlesi
<b>mm</b>	Milimetre
<b>n</b>	İdealite Faktörü

**Simgeler****Açıklamalar**

<b>nm</b>	Nanometre
<b>n<sub>i</sub></b>	Özgün Taşıyıcı Konsantrasyonu
<b>N<sub>a</sub></b>	Taban Tabakadaki Alıcı Konsantrasyonu
<b>N<sub>d</sub></b>	Yayıcı Tabakadaki Verici Konsantrasyonu
<b>N<sub>C</sub></b>	İletkenlik Bandı Etkin Durum Yoğunluğu
<b>N<sub>V</sub></b>	Valans Bandı Etkin Durum Yoğunluğu
<b>Ni</b>	Nikel
<b>O<sub>2</sub></b>	Oksijen
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozon
<b>q</b>	Elementel Yük
<b>P</b>	Güç
<b>P</b>	Fosfor
<b>Pd</b>	Paladyum
<b>P<sub>in</sub></b>	Güneş Gücü
<b>P<sub>m</sub></b>	Maksimum Güç
<b>R</b>	Yansıma Katsayısı
<b>R<sub>s</sub></b>	Seri Direnç
<b>R<sub>sh</sub></b>	Şönt Direnç
<b>sn</b>	Saniye
<b>S<sub>n</sub></b>	Taban Yüzeyi Elektron Rekombinasyon Hızı
<b>S<sub>p</sub></b>	Yayıcı Yüzeyi Hol Rekombinasyon Hızı
<b>Se</b>	Selenyum
<b>Si</b>	Silisyum
<b>T</b>	Sıcaklık
<b>T</b>	Tesla
<b>V</b>	Gerilim
<b>V</b>	Volt
<b>V<sub>m</sub></b>	Maksimum Gerilim
<b>V<sub>oc</sub></b>	Açık Devre Gerilimi
<b>V<sub>T</sub></b>	Termal Potansiyel
<b>Zn</b>	Çinko
<b>α</b>	Soğurma katsayısı

**Simgeler****Açıklamalar**

$\alpha$	Termal Genleşme Katsayısı
$\beta$	Debye Sıcaklığıyla İlgili Katsayı
$\eta$	Enerji Dönüşüm Verimi
$\eta_c$	Toplama (Biriktirme) Olasılığı
$\phi_0$	Yayıcı Yüzeydeki Spektral Foton Akısı
$\phi_0'$	Taban-Yayıcı Arayüzeydeki Spektral Foton Akısı
$\gamma$	Gamma
$\infty$	Sonsuz
$\lambda$	Foton Dalgaboyu
$\mu m$	Mikrometre
$\mu_n$	Elektron Mobilitesi
$\mu_p$	Hol Mobilitesi
$V_{oc}$	Normalize Edilmiş Açık Devre Gerilimi
$\nu$	Foton Frekansı
$\Omega$	Ohm
$^{\circ}C$	Santigrat Derece
$\sigma_{cr}$	Kritik Kararlı Kesme Gerilimi
$\tau_n$	Taban Tabakadaki Elektron Azınlık Taşıyıcı Ömür Süresi
$\tau_p$	Yayıcı Tabakadaki Hol Azınlık Taşıyıcı Ömür Süresi

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>a-Si</b>	Amorf-Silikon
<b>AFM</b>	Atomik Kuvvet Mikroskopi
<b>AM</b>	Hava Kütlesi
<b>AM0</b>	Atmosfer Dışında Spektrum
<b>ASTM</b>	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
<b>BSF</b>	Arka Yüzey Alanı
<b>CdS</b>	Kadmiyum Sülfür
<b>CdTe</b>	Kadmiyum Tellür
<b>CH<sub>4</sub></b>	Methan Gazı
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>CPV</b>	Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik
<b>Cz</b>	Czochralski
<b>eV</b>	Elektron-Volt
<b>FWHM</b>	Pik Yarı Genişliği
<b>GaAs</b>	Galyum Arsenik
<b>GeO</b>	Germanyum Mono-Oksit
<b>HF</b>	Hidrojen Florür
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Su
<b>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></b>	Hidrojen Peroksit
<b>InGaP</b>	İndiyum Galyum Fosfat
<b>InP</b>	İndiyum Fosfat
<b>IR</b>	Kızılötesi
<b>I-V</b>	Akım-Gerilim
<b>J-V</b>	Akım Yoğunluğu-Gerilim
<b>MgF<sub>2</sub></b>	Magnezyum Florür
<b>MOCVD</b>	Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi
<b>PECVD</b>	Plazma-Destekli Kimyasal Buhar Birikimi
<b>PV</b>	Fotovoltaik
<b>NH<sub>4</sub>OH</b>	Amonyum Hidroksit
<b>RIE</b>	Reaktif İyon Aşındırma
<b>RMS</b>	Ortalama Karekök
<b>SIMS</b>	İkincil İyon Kütle Spektroskopisi

**Kısaltmalar****SOD****TPV****TW****UV****ZnS****ZnTe****Açıklamalar**

Spin-on Katkı

Termo-Fotovoltaik

Terawatt

Ultraviyole

Çinko Sülfür

Çinko Tellür



## 1. GİRİŞ

Günümüzde; Germanyum (Ge) hem eşsiz malzeme karakteristikleri hem de Ge kristal arıtımı ve Ge kristal büyütümü alanındaki gelişmiş durumun doğrudan bir sonucu olarak güneş hücrelerinden mikroelektroniklere, optiklerden radyasyon detektörlerine kadar geniş çeşitlilikte uygulamalarda kullanım alanı bulmuştur [1,2]. Ge, modern malzeme bilimi ve alanında önemli bir malzemedir [3]. Kızıl ötesi optikler için pencere ve mercek olarak kullanılır [3,4]. Gamma-ışını detektör uygulamaları için önemli bir malzemedir [3,4]. Ge, CMOS, fotodetektörler ve güneş hücreleri gibi çeşitli uygulamalar için yarıiletken bir malzeme olarak ilgi görmektedir [5]. Ge dilimler, III-V grubu bileşik yarıiletken-temelli güneş hücreleri için bir alttaş malzemesi olarak sıklıkla kullanılırlar [1,6,7]. Yüksek verimli güneş hücrelerinde ya da termofotovoltaik (TPV) hücrelerinde uygulamalar için,  $1800\text{ nm}$ 'ye kadar dalgaboylarına sahip olan fotonların soğurulabilmesine imkan sunan göreceli olarak düşük enerji-bant aralığı ( $0,67\text{ eV}$ ) nedeniyle ilgi çekici bir malzemedir [5]. p-n eklem yarıiletken aygıtların temel yapıtaşı olduğundan dolayı; eklemlerin yüksek kaliteye sahip bir şekilde oluşturulması aygıtların performansı açısından çok önemlidir [8]. Epitaksiyel olarak büyütme [3,9], üst eklemlerinde üretildiği süreç içinde katkılama [10-12], iyon implantasyonu [10,13,14], katı-faz difüzyon katkılama [10,15] ve spin-on katkı (spin-on dopant-SOD) kaynağından difüzyon ile katkılama [5,9,16-18] gibi Ge p-n eklemleri oluşturmak için çeşitli teknikler, III-V grubu bileşik yarıiletken çok eklemli güneş hücrelerinde Ge-temelli alt hücrelerin üretimi için araştırılmıştır [10].

Ge kristalleri, genellikle bir vakum ya da asal gaz atmosferinde grafit bir pota kullanarak Czochralski (Cz) tekniği ile büyütülür [1,7]. Cz tekniği ile mükemmel Ge malzemesine en yakın kaliteye sahip Ge-tek kristalleri büyütülebilir ve bu tek-kristaller yukarıda bahsedilen çeşitli uygulamalar için vazgeçilemeyecek kadar önemlidir [1]. Cz tekniği, hacimli tek-kristallerin büyütülmesi ve üretilmesi için şüphesiz en yaygın ve en gelişmiş yöntemdir [19,20]. Yüksek kaliteli hacimli tek-kristallerin büyütülmesi ve üretilmesi için Cz tekniğinin seçilen yöntem olması, sahip olduğu yüksek teknik seviye ve işlem otomasyon derecesinden kaynaklanmaktadır [20].

Enerji kaynakları, gelişmiş bir toplumun temel olarak tüm alanları için önemli bir parça haline gelmiştir. Günden güne artan yaşam standartları, artan enerji kullanımını gerektirir. Bu durum, insan toplumunu enerjiye gittikçe daha fazla bağımlı yapar. 2005 yılında, dünya çapındaki toplam güç tüketim miktarı 13 terawatt (TW) kadardır ve 2050 yılında beklenen talep miktarı 30 TW'dır [18]. Nükleer enerji, rüzgar enerjisi, jeotermal enerji ve diğer yenilenebilir enerjiler arasında sadece güneş enerjisi tüketim miktarı ile tahmin edilen talep miktarı arasındaki farkın karşılanması için gerekli kapasiteye sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan talep nedeniyle güneş hücrelerinin üretimi son yıllarda önemli ölçüde ilerlemiştir [18]. Güneş hücreleri, PV hücreler olarak da adlandırılmaktadır [21]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan PV hücreler, p-n eklemlerden oluşmaktadır [22]. Diğer bazı yöntemlerin aksine; güneş hücreleri az bakım gerektirir, gürültü kirliliğine sebebiyet vermez, zehirli olmayabilir ve binalara estetik bir şekilde entegre edilebilir [9]. Güneş hücrelerinin teknolojisi, hücre üretiminde kullanılan malzemeler ve hücre üretim türleri üzerine daha iyi performansların elde edilebilmesi için araştırmalar yapılmış ve zaman içerisinde gelişimler kaydedilmiştir [21]. Kristal-Silisyum (Si) tabanlı güneş hücreleri (tek-kristal Si (c-Si) ve çoklu kristal Si (mc-Si)), ince film tabanlı güneş hücreleri (amorfsi (a-Si), Kadmiyum Tellür (CdTe), Kadmiyum Sülfür (CdS), Bakır İndiyum Galyum (de) Selenyum ((Cu(InGa)Se<sub>2</sub>)-CIGS)), organik tabanlı güneş hücreleri, boya duyarlı güneş hücreleri ve III-V grubu PV hücreler üzerine çalışmalar gerçekleştirilmektedir [9,18,21,22]. Tek eklemlerli PV hücreler, hücre yapısında kullanılan yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığının kısıtlı değerinden dolayı güneş spektrumunun geniş bir skalasında foton soğurumu gerçekleştirilemez. Güneş spektrumundan maksimum derecede faydalanılamaması, sadece belirli bir bölgede soğurmanın gerçekleştirilmesinden dolayı; tek eklemlerli güneş hücrelerinde verim değerleri düşüktür [22]. Tek eklemlerli hücrelerdeki büyük enerji kayıpları, enerji-bant aralığından büyük enerjili fotonların soğurulması sonucu fazla enerjiden kaynaklanan termalizasyondan ve enerji-bant aralığından küçük enerjili fotonların hücre tarafından soğurulamaması ve bu nedenle elektrik üretimine katkı sağlayamamasından dolayı meydana gelmektedir [18,22]. Tek eklemlerli güneş hücrelerinde meydana gelen bu enerji kayıpları, daha geniş skalada güneş spektrumundan foton soğurarak spektrumun daha etkin bir şekilde kullanılmasına imkan sunan çok eklemlerli güneş hücreleri üzerine çalışmaların arttırılmasına sebep olmuştur [21,22]. Optimizasyonu yapılmış çok eklemlerli hücreler ile bu enerji kayıplarına sebep olan durumlar azaltılabilir [18,21,22] ve böylece daha yüksek verimler elde edilebilir [18]. Yüksek verimli çok eklemlerli güneş hücrelerinin temel fikri, uygulanan spektrumu mümkün olduğu kadar verimli bir şekilde soğurmak için farklı enerji-bant aralıklı

birden fazla p-n eklemli yarıiletken katmanı üst üste istiflemektir [9,21,22,23]. Sonlu bir miktarda eklem içeren çok eklemli güneş hücrelerinin tasarımında önemli bir konu, enerji-bant aralıkları mümkün olan en iyi kombinasyonlu doğru malzemeleri seçmektir [9]. Yüksek verimli çok eklemli bir güneş hücresinin üretilebilmesi için farklı enerji-bant aralıklı malzemelere ihtiyaç duyulur. Bu amaç için, *III-V* grubu bileşik yarıiletkenler en uygun seçenek olarak görülmektedir. *III-V* grubu bileşik yarıiletken malzemeleri içeren çok eklemli güneş hücreleri, yüksek güç çıkışı ve dönüşüm verimi, yüksek termal dayanım ve radyasyon direnci gibi üstün özellikleri nedeniyle, yoğunlaştırıcı PV sistemlerinde ve uzay kalifiye güneş hücresi uygulamalarında kullanılmaktadır [23]. İstifleme işlemi, monolitik ya da mekanik olmak üzere genellikle iki şekilde gerçekleştirilebilir [9,18]. Monolitik olarak istifli çok eklemli güneş hücreleri, bir alttaş üzerine doğrudan büyütülen bir dizi eklem sahiptir [18]. Bu eklem, tünel diyotlar ile birbirine seri olarak bağlanır [18,23]. Sonuç olarak; sadece iki terminal vardır [18]. Moleküler demet epitaksi (MBE) ve metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) teknolojilerindeki ilerlemeler iki terminal monolitik istifli çok eklemli güneş hücrelerinde önemli gelişmelere sebebiyet vermiştir. Uyduların enerji ihtiyacı genellikle yüksek verimli *III-V* güneş hücreleri tarafından sağlanır. Geçmişte bu güneş hücreleri, hacimli galyum arsenik (GaAs) alttaşları üzerine *III-V* tabakaların epitaksiyel büyütümü ile üretilirdi. Fakat; Ge ve GaAs malzemelerin kristal yapıları, örgü parametreleri ve termal genişleme katsayılarını içeren örgü karakteristikleri arasındaki mükemmel uyum, Ge'nin alttaş olarak kullanımına yol açmıştır [1]. Ge alttaşlar, yüksek kristalografik mükemmellik, yüksek mekanik güç ve geri dönüşülebilirlik gibi GaAs alttaşlara göre belirli avantajlar sunmaktadır [1]. Ge'nin kullanımı maliyet açısından daha uygundur [21]. Ayrıca sonrasında; düşük band aralığı nedeniyle Ge'nin aktif bir eklem olarak kullanılması, daha yüksek dönüşüm verimi değerlerinin elde edilmesine yol açmıştır [1,3,9]. Ge'nin düşük enerji-bant aralığı, alt hücresi Ge p-n ekleminden oluşan çok eklemli güneş hücrelerinde, hücrenin güneş spektrumunun daha uzun dalgaboylu bölgelerinde foton soğurumu yapabilmesine sebep olur ve bu da daha yüksek dönüşüm verimliliklerinin sağlanması sonucunu doğurur [1,9,21]. Sonuç olarak; Ge, monolitik olarak istifli iki terminal çok eklemli güneş hücrelerinde bir alttaş ve alt hücre olarak sıklıkla kullanılır. Burada; Ge p-n eklemi, *III-V* üst hücrelerin büyütümü işleminde As ya da fosfor (P)'nin p-tipi Ge alttaş içerisine difüzyon edilmesiyle gerçekleştirilir [5,9]. Çok eklemli GaAs-temelli güneş hücreleri için alttaş olarak Ge dilimlerin kullanılmasına imkan vermek için, 90'lı yıllarda Ge kristallerin dislokasyonsuz büyütülmesi geliştirildi. Dislokasyonların yokluğu, Ge alttaş üzerinde yüksek kaliteli epitaksiyel GaAs tabakaların büyütülmesine imkan verir. Ayrıca;

dislokasyonlar, azınlık taşıyıcı ömür süresini azaltır ve dolayısıyla Ge alt hücrenin çok eklemli istifin toplam verimliliğine katkısını etkileyebilir. Çeşitli malzemeleri birleştirmek için kullanılan bir başka yöntem, mekanik istiflemedir. Hücreler ayrı ayrı üretilirler. Daha sonra üst üste istiflenirler. Hücreler birbirlerine paralel olarak bağlanırlar. Mekanik olarak istifli hücreler, dört ya da daha fazla terminale sahiptirler [9,18]. Mekanik olarak istifli çok eklemli güneş hücrelerinde en alt hücre yapısı için uygun malzemeler, Ge, GaSb,  $In_{0,53}Ga_{0,47}As$  gibi  $0,6 eV$  ile  $0,9 eV$  arasında bir enerji-bant aralığına sahip olan düşük enerji-bant aralıklı malzemelerdir. Yukarıda bahsedilen düşük enerji-bant aralıklı malzemeler arasında; Ge, maliyet açısından en uygun olan malzemedir. Ge güneş hücreleri, mekanik olarak istifli çok eklemli güneş hücrelerinde en alt hücre olarak kullanılmaktadır [5,9,18,24]. Düşük enerji-bant aralığı değeri ile Ge, üst hücrelerin altında kullanılmak üzere uygun bir malzemedir ve bununla birlikte göreceli olarak yüksek bir verimlilik sağlar [9]. Ge güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar, yüksek performanslı mekanik bir istifin daha sonrasında üretimi açısından büyük önem taşımaktadır [24].

Güneş hücrelerinin standart test koşulları altında karakterizasyon işlemleri,  $25 ^\circ C$  ( $298 K$ ) sıcaklıkta gerçekleştirilir. Fakat; PV kurulumlarda çalışma sıcaklıkları bu değerden dikkate değer bir şekilde sapabilir, farklılık gösterebilir. Çalışma koşulları, esas olarak aydınlatma seviyesine, dış ortam sıcaklığına, rüzgar hızına, PV modülün konumuna ve üretilen ısıyı dağıtma kapasitesine bağlıdır [25]. Uygun bir konsantrasyon oranında, yoğunlaştırılmış ışık, güneş hücrelerinin dönüşüm verimliliğini arttırabilir. Güneş hücresinin sıcaklığının yoğunlaştırılmış ışık uygulamaları altında artacağı göz önünde tutulmalıdır [26,27]. Sıcaklık, güneş hücrelerinin performansını etkileyen önemli bir faktördür [25-42].

Güneş hücrelerinin gelişimine katkı sağlamak amacıyla teorik çalışmalar gerçekleştirilir. Bu çalışmalar, güneş hücre aygıtlarındaki fiziksel davranışların daha iyi anlaşılabilmesine yardımcı olur. Araştırma-Geliştirme (Ar-Ge) süreleri, hücre modelleme yöntemlerinde ve yazılımlarında elde edilen gelişimler sayesinde kısaltılmaktadır. Geliştirilen bu yöntemler ve yazılımların geneli, güneş spektrumunun spektral ışıyım değerlerinden yararlanarak güneş hücresinin elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan analitik güneş hücre modeline dayanmaktadır [22]. Verilen bir ışık spektrumuna göre; bir güneş hücresinin foto-cevabının hesaplanması, hem azınlık hem de çoğunluk taşıyıcıları için süreklilik ve akım denklemleri ve Poisson denklemini içeren beş diferansiyel denklem kümesinin çözümünü

gerektirir [22,43]. Bu denklemleri çözmek için analitik güneş hücre modeli kullanılabilir [22].

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda belirtilmektedir. Ge güneş hücresi performansını belirleyen kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$ , açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , dolum faktörü  $FF$  ve enerji dönüşüm verimi  $\eta$  parametreleri üzerinde sıcaklığın etkisi,  $200\text{ K}$ 'den  $400\text{ K}$ 'ye kadar sıcaklık aralığında,  $25\text{ K}$ 'lik adımlarda,  $AM1,5G$  spektrum,  $I$ -güneş aydınlatması altında teorik olarak araştırıldı. Sıcaklık etkisiyle parametrelerde meydana gelen değişimler için sebepler tartışıldı. Ayrıca; parametreler,  $298\text{ K}$  sıcaklıkta da teorik olarak belirlendi. Teorik çalışmalar için analitik güneş hücre modeli kullanıldı. Ge güneş hücresi fabrikasyon işleminde kullanılmak üzere; alttaş üretimi gerçekleştirildi. Ga katkılı Ge tek-kristal külçesi, Cz hacimli tek-kristal büyütme tekniği ile büyütüldü. Tek-kristal külçe, elmas tel testere sistemi kullanılarak dilimlendi. Lepleme ve parlatma sistemi aracılığıyla; kesilen dilimin arka yüzeyi leplenirken, ön yüzeyi ise leplendi ve parlatıldı. Elde edilen dilimin yapısal karakterizasyonu, X-ışını kırınım (X-ray diffraction-XRD) analizi ile belirlendi. Dilim, kare şekilli parçalara bölündü. Üretilen kare şekilli alttaşlardan bir tanesinin morfolojik ve elektriksel karakterizasyonları, sırasıyla atomik kuvvet mikroskobu (atomic force microscope-AFM) sistemi ve Hall etkisi ölçüm sistemi kullanılarak belirlendi. Üretilen p-tipi Ge numunelerinden bir tanesinin alttaş olarak kullanıldığı bir Ge güneş hücresi fabrikasyon işlemi gerçekleştirildi. Üretilen p-tipi Ge alttaşlarda yayıcı difüzyonu işlemleri, P-içerikli bir SOD kaynağı kullanılarak yapıldı. Üretilen p-tipi Ge alttaşlarda  $n^+$  yayıcılar oluşturmak için gerçekleştirilen difüzyon işlemlerinin ardından; P-difüzyonu derinlik profilleri, ikincil iyon kütle spektroskopisi (secondary ion mass spectroscopy-SIMS) ölçümleri ile belirlendi. Ge güneş hücresi fabrikasyon işleminde; hücrenin arka taraf işlemi, sonrasında yüksekçe katkılı bir p-tipi bölgesi oluşturmak için ötektik sıcaklık üzerinde tavlama işlemli alüminyum (Al) buharlaştırılarak gerçekleştirildi. Aygıtın aktif bölgesini oluşturmak için, mesa aşındırma işlemi yapıldı. Mesa aşındırma işlemi gerçekleştirildikten sonra; AuNiGe buharlaştırılması ile ön kontak metalizasyonu işlemi yapıldı. Üretilen Ge güneş hücresi üzerinde akım-gerilim ( $I$ - $V$ ) ölçümleri,  $298\text{ K}$  ortam sıcaklığında,  $AM1,5G$  spektrum,  $I$ -güneş aydınlatması altında gerçekleştirildi ve ilgili performans parametreleri belirlendi. Elde edilen deneysel sonuçlar literatürle kıyaslandı. Elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle kıyaslandı.

Tez çalışması aşağıda belirtildiği şekilde tasarlandı:

Birinci bölümde; Ge yarıiletken malzemesi kullanım alanları, Cz üretim tekniği, güneş hücresi çalışma sıcaklığı ve analitik güneş hücre modeli hakkında bilgiler ile birlikte bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sunuldu. İkinci bölümde; Cz hacimli tek-kristal büyütme tekniğiyle ilgili genel bilgiler ifade edildi. Üçüncü bölümde; güneş hücresi üzerine genel bilgiler verildi. Dördüncü bölümde; analitik güneş hücre modeli üzerine bilgiler ifade edildi. Beşinci bölümde; sıcaklığın Ge güneş hücre performansı üzerindeki etkisi incelendi. Altıncı bölümde; deneysel çalışmalar için kullanılan karakterizasyon analiz sistemleri verildi. Yedinci bölümde; Ge altaş üretim sürecinde gerçekleştirilen işlemler ile birlikte XRD, AFM ve öz direnç ve Hall etkisi ölçümleriyle belirlenen yapısal, morfolojik ve elektriksel karakterizasyonlar sunuldu. Sekizinci bölümde; Ge güneş hücre uygulaması üzerine literatür bilgisi, Ge güneş hücresi üretim sürecinde gerçekleştirilen işlemler, SIMS ve  $I-V$  ölçümleriyle belirlenen P-difüzyonu derinlik profilleri ve Ge güneş hücresi aygıt karakterizasyon sonuçları, belirlenen aygıt karakterizasyon sonuçlarının çeşitli çalışmalarla kıyaslamaları sunuldu. Son bölümde ise; gerçekleştirilen çalışmalar özetlendi.

## 2. CZOCHRALSKI (CZ) TEK-KRİSTAL BÜYÜTME TEKNİĞİ

1916'da, Prof. Jan Czochralski, kristallerin bir çekme mekanizmasıyla eriyikten büyütülebildiğini gösterdi [44]. Cz yöntemi, geniş bir aralıktaki elektronik ve optik malzemelerin hacimli tek-kristallerinin üretimi için baskın yöntemdir [45]. Ge, Cz çekme yönteminin ilk olarak 1950'lerde Teal ve Little tarafından Bell laboratuvarlarında üzerinde öncülük edildiği malzemedir [1].

Ekonomik nedenlerden dolayı, silindirik kısmı mümkün olduğu kadar büyük çaplı ve uzunluklu büyütme önemlidir [45]. Otomatik çap kontrolü, bir ağırlık algılama sistemi ya da menisküsün kamera ile izlenmesi aracılığıyla yapılabilir [1].

Pota, bir Cz çekicinin en önemli unsurlarından biridir. Polikristal malzemenin yanı sıra pota malzemesi, kristale başlıca safsızlık kontaminasyonu kaynağı olarak düşünülmelidir, çünkü bütün büyütme süreci boyunca eriyik ile temas halindedir [44]. Pota, bir sütuna takılmış kaide üzerine yerleştirilir [44,46]. Bu sütun ise, potanın dönüş hareketini ve dikey doğrultudaki hareketini sağlayan bir birime bağlıdır. Dikey hareket, eriyik yüzeyi seviyesini ayarlamak için kullanılır; bu durum optik çap kontrol sistemi için gereklidir [44].

Sıcak-bölge, büyütme sürecini, eriyik ve gaz akışını ve iç nokta kusurlarının ve onların kümeleşmelerinin konsantrasyonunu kontrol etmede en önemli kısımdır [44]. Bir Cz çekicinin kalbi sıcak-bölgedir. Isıtıcı, ısı kalkanları (yalıtım parçaları), ışınım kalkanı gibi parçalar sıcak-bölge unsurlarıdır. Bu parçaların tasarımı, eriyikteki radyal ve dikey termal gradyentleri belirler. Bu termal karakteristikler, arayüzey şekli ve ilgili termal gerilim üretimi gibi büyütme karakteristikleriyle çok yakından ilişkilidir [47].

Ge hacimli kristal büyütmesi için başlangıç malzemesi, özellikle elektriksel olarak aktif safsızlıklar bakımından yüksek saflıkta olmalıdır. Kızıl ötesi (IR)-dereceli ve elektronik-dereceli Ge tek-kristallerin büyütülmesi için başlangıç malzemelerindeki elektriksel olarak aktif safsızlıkların konsantrasyonu  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 'ü aşmamalıdır. Gamma ( $\gamma$ )-ışını detektör uygulamaları için; yüksek saflıklı Ge kristallerin büyütülmesi için, başlangıç malzemesindeki elektriksel olarak aktif safsızlık konsantrasyonunun  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 'ten daha az

olması gerekmektedir [1]. Farklı uygulamalar için Ge kristalleri, istenilen elektriksel taşıyıcı konsantrasyonunu göstermek için belirli bir element ile katkılanmaya ihtiyaç duyar. p-tipi iletkenlik sağlamak için periyodik tablonun III. grubundan bir element, n-tip için V. gruptan bir element kullanılır [48]. Katkı malzemelerinin seçimi, onların ayırım (segregasyon) davranışına, Ge'deki katı çözünürlüğüne ve mevcut saflığına bağlıdır [1,45,48-50].

Bir çekirdek tutucuya yerleştirilen çekirdek tek-kristalin sıcaklık stabilizeli eriyiğe daldırılmasının ardından; kristal büyütme işlemi başlar ve büyüyen kristal çekirdek tek-kristal tarafından tutulur. Çekirdek tutucu, kristalin dönüş hareketini ve dikey doğrultudaki hareketini sağlayan dönme ve çekme birimine bağlı olan ya bir çekme sütununa ya da bir çekme teline bağlıdır. Sütun sisteminin bir ana avantajı, sırasıyla çekirdeğin ya da kristalin yörüngesel bir hareketine karşı daha yüksek mekanik kararlılığıdır. Bu daha yüksek dönüş hızlarına izin verir. Tel halat, çekicinin yüksekliğini azaltan sistemin tepesinde sarılabilmesi avantajına sahiptir. Çekme ve dönüş hızları güçlü ölçüde kristal çapına ve sıcak-bölge geometrisine bağlıdır. Cz işlemi için çekirdek kristaller, dislokasyonsuz hacimli kristallerden hazırlanır [44]. Ge büyütmesi için, çekirdek genellikle tek-kristal bir Ge'den kesilmiş küçük bir silindirdir, silindir eksenini çekilecek kristalin kristalografik yönelimi boyuncadır [1].

Cz kristal büyütmedeki en önemli bölge menisküstür. Menisküs, eriyik ve kristal arasında ara-bağlantıdır. Menisküs ve menisküsün şekli gravitasyonel kuvvetler ve yüzey geriliminden kaynaklanır. Menisküsün üst ucunda sözde faz sınırı ya da başka bir ifadeyle arayüzey bulunur. Burada kristalleşme meydana gelir ve öylelikle gizli ısı açığa çıkarılır. Kristal, fırının daha soğuk bölgelerine yukarı doğru çekildiğinden, bir sıcaklık gradyenti kurulur; bu durum sıcak arayüzeyden daha soğuk kristal içine iletim vasıtasıyla bir ısı akışına yol açar. Bu mekanizma ile kristalleşme büyütme işlemi boyunca devam ettirilir [51].

Malzeme, silindirik şekilli bir potada eritilir [45]. Malzemenin kontrollü bir şekilde erimesini başarmak için, ısıtıcı gücü ayarlanmalıdır. Pota duvarının sıcaklığı, potanın mekanik sertliğini kararsızlaştırabilecek ve potanın korozyonunu şiddetlendirebilecek değeri aşmamalıdır [44]. Tam erimeyi ve boşluğa ya da negatif kristal kusurlarına sebebiyet verebilen ufak kabarcıkların eriyikten püskürtülmesini sağlamak için, eriyik bir süre boyunca erime noktasının biraz üzerinde bir sıcaklık aralığında tutulur [44,52]. Eriyiğin

saflığı, büyütülen kristalin saflığını belirler [44]. Çekirdek, dönüş altında ön ısıtma için aşağıya eriyik yüzeyine yakın bir konuma dikkatlice indirilir [1,44,53]. Çekirdeğin alt ucu, daha sonra sıcaklık stabilizeli eriyiğe daldırılır [1,44]. Çekirdek tek-kristalin eriyik yüzeyine yakına indirilmesi, çekirdek tek-kristalin alt ucu daha sonra eriyiğe daldırıldığında, termal şoku en aza indirmek için zorunludur. Kısacası, çekirdeğin alt ucu eriyiğe daldırıldığında, termal şoku en aza indirmek için daldırma işlemi öncesinde ön ısıtma işleminin gerçekleştirilmesi zorunludur. Çekirdeğin temas ettiği yüzey alanının yakınında eriyiğin termal sınır koşulları, sıcaklık kontrolü ve çekirdeğin ve potanın dönme hareketleri ile dikkatlice ayarlanmalıdır [44]. Kristal, safsızlıkların dağılımını homojenize etmek ve sıcaklık alanındaki homojensizlikleri ortadan kaldırmak için döndürülür. Pota, eriyik akışını kararlı hale getirmek için, kristale karşıt yönde döndürülür [46].

Daldırılmış çekirdeğin belirli bir kısmının yeniden eritilmesi ve bir eriyik menisküsü oluşturulması için ısıtıcının gücünü dikkatli bir şekilde ayarlamak önemlidir [45]. Çekirdeğin küçük bir kısmı eritilirse ve eriyik yüzeyi ile çekirdek alt yüzeyi arasında kararlı bir eriyik menisküsü oluşursa, koşullar en uygundur [44,45]. Bu yeniden eritilmiş, yeni oluşturulmuş çekirdek yüzeyi, eriyikten çekirdek arayüzeyine atomlar eklenerek yeni kristalin büyütülmesinin başlatıldığı, başlangıç eriyik-kristal arayüzeyidir [44]. Çekirdek, dönüş altında yavaşça eriyikten çekilir ve eriyik, çekirdeğin eriyik-kristal arayüzeyinde yeni bir kristal kısım oluşturarak kristalleşir [44,45]. Bu kristalin şekli, özellikle çapı, ısıtma gücünü, çekme hızını, kristal ve potanın dönüş hızlarını ayarlayarak kontrol edilir [45,54].

Cz tekniğinin önemli avantajlarından birisi, büyük kristallerin dislokasyonsuz büyütülmesi imkanındır [44]. Boyun işlemi, dislokasyonsuz Cz büyütmede en kritik adımlardan birisidir. Başarılı bir boyun işlemi olmadan büyütmenin sonraki aşaması başlatılamaz. Çekirdek kristalin eriyiğe daldırılmasının ardından pürüzsüz bir menisküs oluşursa, Dash'ın tekniğine dayanan boyun işlemi başlatılabilir [47]. Cz'de kullanılan çekirdek kristaller genellikle dislokasyonsuz olsa da, çekirdek kristal sıcaklık stabilizeli eriyiğe daldırıldığında, sıcaklık şoku tarafından sebep olunan yüksek termal gerilimlerden dolayı, çekirdek kristalde dislokasyonlar üretilir [1,44,47,48,50]. Bu dislokasyonlar, kristal çapının silindirik gövdenin hedef değerine kadar arttırıldığı omuz aşamasına başlanılmadan önce giderilmek zorundadır [44,47,55]. Dislokasyonların sonlanması için bir işlem olan boyun, dislokasyonsuz büyütmeyi başarmak için gerçekleştirilir [1,46,47]. Yüksek termal gerilimlerden dolayı üretilen bu dislokasyonlar, özellikle büyük bir kristal çapı durumunda genellikle büyüyen

kristal içine yayılırlar. Kristalin iç ve dış bölgeleri arasındaki farklı soğuma hızlarının bir sonucu olarak meydana gelen termo-elastik gerilim, büyük kristaller durumunda dislokasyon hareketi için büyük bir ihtimalle ana sebeptir. Kristaldeki yüksek gerilim ve sıcaklık nedeniyle; dislokasyonlar kayma düzlemleriyle sınırlı olmayıp, çapraz kayma, tırmanma ve çoğalma yollarıyla komşu kayma düzlemlerine yayılmak için yeterli miktar enerji alır [47,48,50].

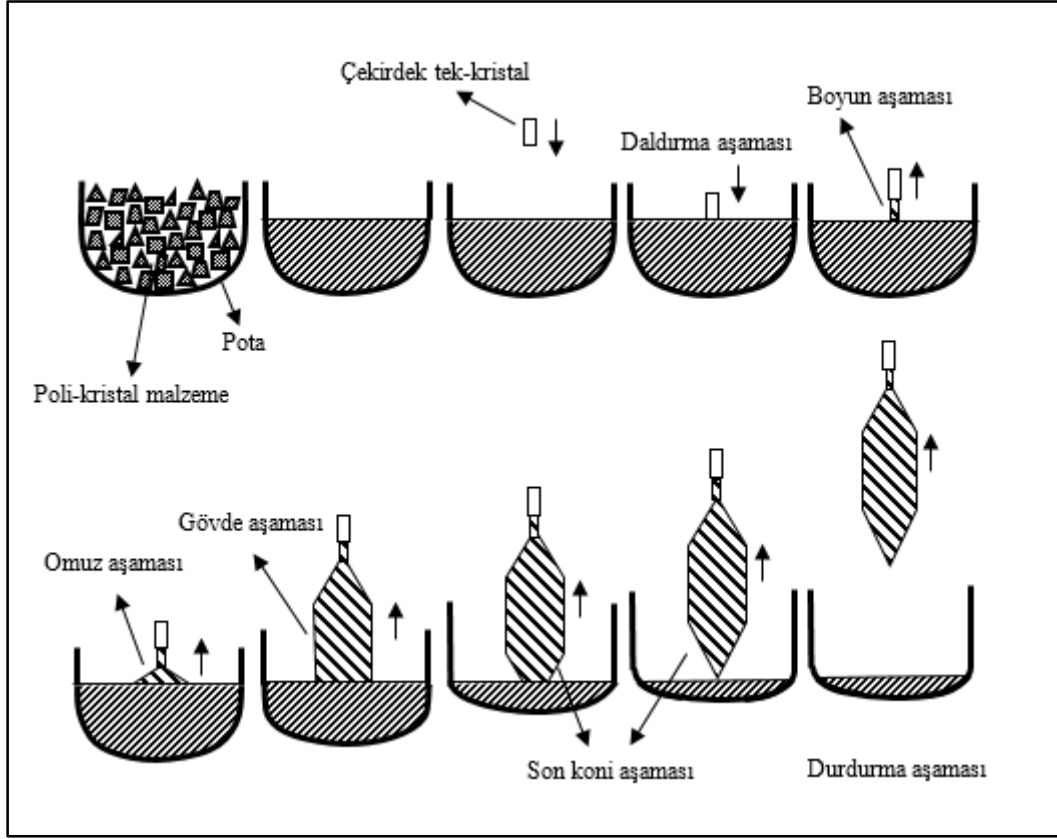
Kristal, çapı azaltılır ve birkaç cm boyunca hızlı çekilirse, bu dislokasyonlar sözde Dash necking olarak ifade edilen teknikle sınırlandırılabilirler [1]. Dislokasyonsuz büyütme genellikle birkaç santimetrenin ardından elde edilir [46-48]. Boyunun ilk safhasında çap büyükken; termal gerilim, kayma, çapraz kayma ve tırmanma mekanizmaları ile dislokasyon hareketlerine sebep olur; çünkü sıcaklık, plastik sıcaklığın üzerindedir ( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [1,47]. Elmas-yapı kristallerindeki dislokasyonlar, tercihen ana kayma düzlemleri olan  $\{111\}$  düzlemlerinde yayılırlar. Bir Si ya da Ge kristali, bir  $\langle 100 \rangle$  ya da  $\langle 111 \rangle$  yöneliminde çekildiğinde;  $\{111\}$  düzlemlerinin bütün yönelimleri, çekme eksenine eğiktir. Bu yüzden;  $(a/2) [101]$ -tip Burgers vektörlü bütün dislokasyonlar, kayacak ve kristal boyutunun çok küçük bir boyuta azaltılması (bu yüzden; küçük kalan gerilim, dislokasyonları hareket ettiremeyebilir ya da yenilerini üretemeyebilir) ve arayüzeyde yeni dislokasyonların oluşturulmaması koşuluyla kristal yüzeyinde sonlanacaklardır [1,47,48,50].  $\langle 110 \rangle$  büyütmesi için;  $\langle 110 \rangle$  bir  $\{111\}$  düzleminde bulunduğundan, çekirdek dislokasyon giderimini kolaylaştırmak için, çekme ekseninden  $\{111\}$  düzlemine dikey yöne doğru birkaç derece yönlendirilmelidir. Yüksek hız çekme altında boyun 2-4 mm çaptayken, gerilim nispeten küçüktür; bu durum var olan dislokasyonların yavaş hareketine ya da hiç hareket etmemesine sebep olur. Dislokasyon hareketleri, ilerleyen katı-sıvı arayüzeyden daha yavaş olduğu zaman, dislokasyonsuz büyütme elde edilir [47,48]. Sonuç olarak; boyun safhası süresince kalan termal gerilimler, var olan dislokasyonların hareketine ve yenilerinin üretimine izin vermemek için yeterince düşük tutulmalıdır. Ayrıca; arayüzeyde yeni dislokasyonlar oluşturulmamalıdır [1]. Genellikle; dislokasyonsuz duruma, kristalin simetri pozisyonlarında, aslında bu pozisyonlarda belirgin  $\{111\}$  faset büyümesinden kaynaklanan güçlü çıkıntıların ( $\langle 100 \rangle$  kristalleri için) ya da düzlüklerin ( $\langle 111 \rangle$  kristalleri için) büyümesi eşlik eder [47]. Büyütme işlemleri boyunca kristal yüzeylerinde bu durumların varlığının gözlenmesi, kristallerin tek-kristal ve dislokasyonsuz olarak büyüdüğünün açık bir işareti olarak kullanılabilir [46]. Dislokasyonsuz Si ve Ge külçelerinin büyütülmesini

bildiren ilk kişi Dash'tır. Dislokasyonsuz Si ve Ge kristallerinin büyütülmesi için yöntem aşağıdaki adımlara sahiptir [48]:

(i) Kristal çapı yaklaşık 2-4 mm'ye kadar azaltılır. Birkaç santimetrenin ardından kristal dislokasyonsuz olur [48].

(ii) Boyun işlemi bitirildikten sonra, kristal çapı dikkatli bir şekilde istenilene artırılabilir [1,44]. Kristalin çapı, ısıtıcı gücünü azaltarak ya da çekme hızını azaltarak genişletilir. İstenilen nihai çapa ulaşılmadan kısa bir süre önce, ısıtıcı gücü ve/veya çekme hızı tekrar bu çapın sabit tutulabileceği değere yükseltilir [48].

(iii) Çekme işleminin sonunda, kristalin artık eriyikten geri çekilmesi gerektiğinde, bu ayırmadaki termal şok, hareketsiz plastik sıcaklık aralığının (500 °C üzeri) tamamında katı içine yukarı geriye yönelen, gerilim nedenli üretilmiş dislokasyonlara ve sonuç olarak kristal kalitesinde kayıplara yol açabilir [48]. Silindirik kristal gövdenin büyütülmesinin sonunda, kristalin çapı giderek azaltılmalıdır. Kristalin eriyikten basitçe ayrılması halinde, kristal bir termal şok yaşayacak ve dislokasyonlar oluşturulacaktır. Bu dislokasyonlar, hala yüksek bir sıcaklıkta olan dislokasyonsuz silindirik kristal kısmın içine geriye yayılabilirler. Dislokasyonların geriye yayıldığı mesafe, aşağı yukarı kristal çapına karşılık gelir [44]. Bundan kaçınmak için; sözde son koni olarak adlandırılan bir kısım büyütürük gövde kristal büyütmesinin sonunda çapı azaltmak gerekmektedir [44,48]. Silindirik kısmın ardından; kristalin son bölgesi, çok küçük ya da nokta temas bir çap çekmesine kadar gittikçe inceltilecek bir koni şeklinde büyütülür ve sonra eriyikten ayrılır [1,48]. Son koninin kararlı büyütülmesi için, pota içinde yeterli bir artık eriyik hacminin olması zaruridir. Büyütülen kristalin gövdesinde dislokasyon oluşumuna izin vermeden kristalin eriyikten ayrılabilmesi için, nokta temas bir çap çekmesine kadar inceltilecek bir koni şeklinde büyütülen son kısmın ardından; durdurma aşamasında büyütülen kristal eriyik bölgesinden yukarıya doğru çekilir. Bu işlemde; kristalde plastik deformasyona sebep olan bir termal şoktan kaçınmak için aşırı yüksek bir hız kullanılmamalıdır. Büyütme sürecinin bu aşamasında; soğutma koşullarının (kristalin eriyik yüzeyinden çekilme hızının ve ısıtıcı gücünün zamana bağlı davranışı) uygun kontrolü önemlidir [44]. Bir kristal büyütmesi için Cz sürecinin farklı adımlarının şematik gösterimi, Şekil (2.1)'de verildi.



Şekil 2.1. Cz sürecinin farklı adımlarının şematik gösterimi [44]

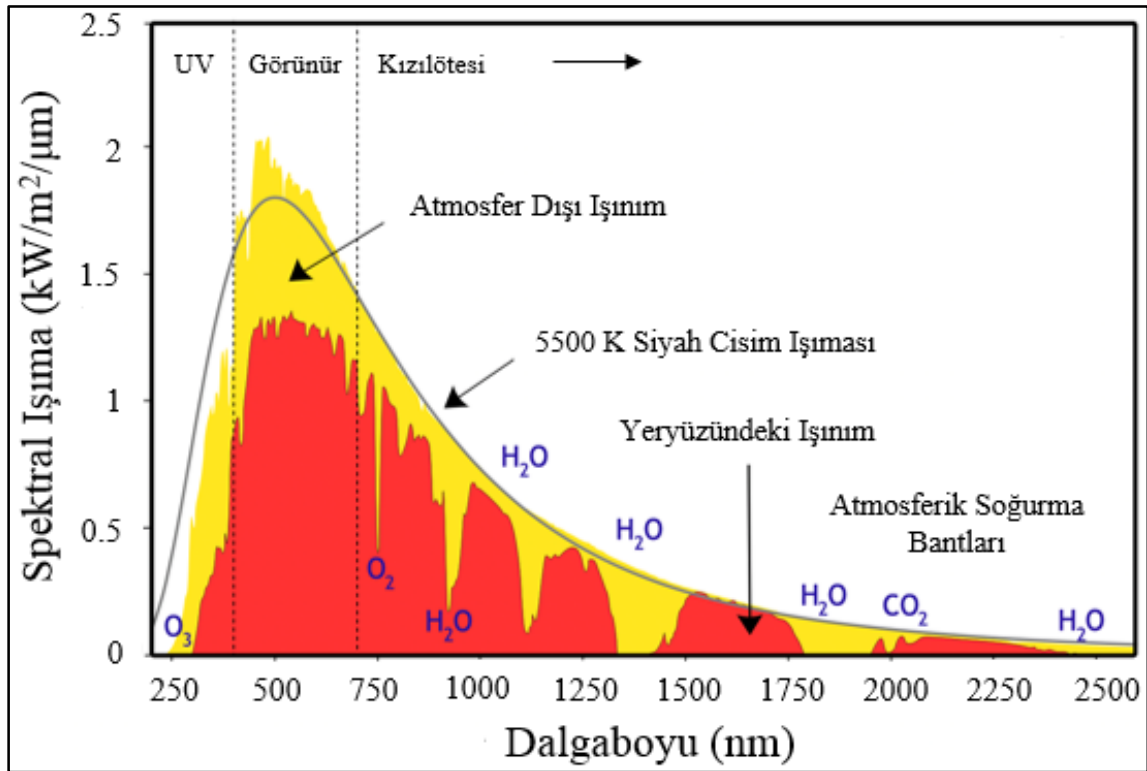
Dislokasyonsuz büyütme, yüksek termal gerilimlere rağmen, büyük çaplı kristaller için bile nispeten karardır. Bunun nedeni, kristalde bir ilk dislokasyonu üretmek için gereken yüksek enerjidir. Ana kayma düzlemleri boyunca kesme gerilimleri, herhangi bir noktada dislokasyonların çekirdeklenmesi ya da çok küçük dislokasyon halkalarının büyümesi için kritik kararlı kesme gerilim  $\sigma_{cr}$  değerini aşmazsa, kristal makroskopik olarak dislokasyonsuz kalacaktır [1,48,50]. Bir Ge kristalinin başarılı bir şekilde dislokasyonsuz büyütülmesi için gerekli koşullar, Cz çekicinin çok iyi termal kararlılığı, başlangıç malzemesinin yüksek saflığı ve optimize edilmiş büyütme reçetesi ve büyütme parametreleridir [1].

### 3. GÜNEŞ HÜCRESİ

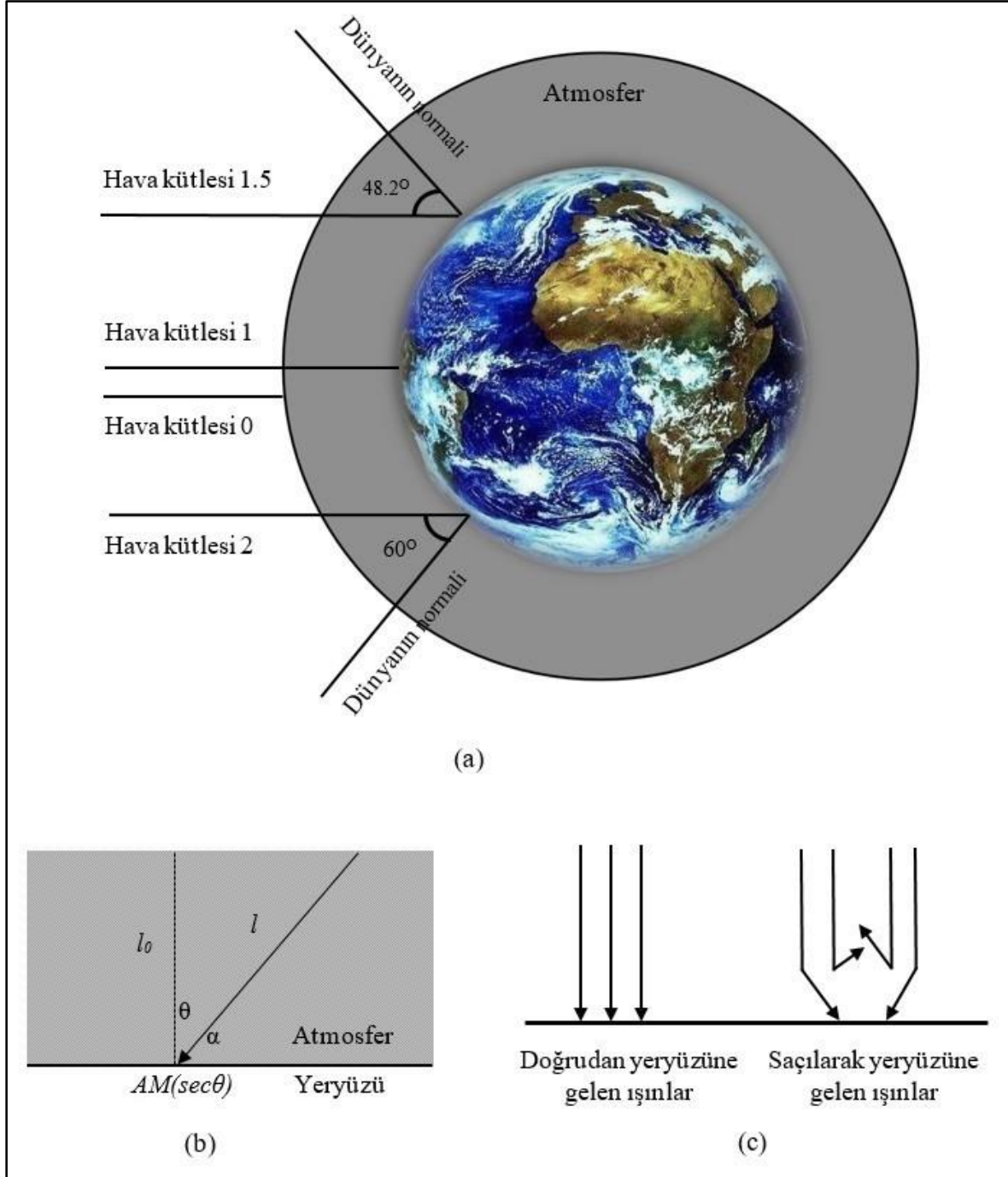
Bu bölümde; hava kütlesi (air mass-AM), PV fiziği ve güneş hücresi çalışma prensibi üzerine bilgiler sunuldu.

#### 3.1. Hava Kütlesi (Air Mass-AM)

Atmosferik etkilerden dolayı, dünya yüzeyine ulaşan spektral ışımaya şiddeti değişir. Atmosferde meydana gelen soğurma, saçılma ve yansımaya süreçleri, güneş ışımaya gücündeki değişime sebep olur. En büyük etki, soğurma ve bazı dalgalarda da saçılmadan dolayı oluşur. Ayrıca atmosferde güneşten gelen ışınların şiddetinin, doğrultusunun ve spektrumunun değişmesine sebep olan su buharı, bulutlar ve kirlilik vb. yerel değişimlerde vardır [56,57]. 5500 K'deki siyah (kara) cismin spektral ışımaya ile birlikte atmosferin dışındaki spektral enerji dağılımı, yeryüzündeki spektral enerji dağılımı ve atmosferik soğurma bantları Şekil (3.1)'de gösterildi [56,58].



Şekil 3.1. Spektral ışımaya spektrumları ve atmosferik soğurma bantları [56,58]



Şekil 3.2. (a) Hava kütlesi durumları, (b) Hava kütlesinin şematik tanımı ve (c) Doğrudan ve saçılarak yeryüzüne ulaşan ışınların gösterimi [56]

Güneşten gelen ışık şiddetinin atmosferin içinden geçerken ne kadar azalacağı, uzaklığa dolayısıyla dünyanın yüzeyindeki konuma bağlıdır. Dünyanın yörüngedeki konumu, gün içinde zamana bağlı olarak değişir. Dünyanın yüzeyine ulaşan ışık şiddeti güneşli bir günde yaklaşık olarak %70'tir. Güneş ışınları atmosfer içinde ilerledikçe soğurma ve saçılmalar artar. Güneş enerjisi yeryüzüne elektromanyetik ışımaya yoluyla ulaşırken, atmosfer içinden geçişi esnasında meydana gelen soğurulmalar ve saçılmalarla dolayı, enerjide azalma

meydana gelir. Bu yüzden, yeryüzüne ulaşan güneş spektrumu atmosfer dışındaki güneş spektrumundan farklılık gösterir [21,22].  $l_0$ 'lık bir atmosfer kalınlığı için, dünyanın yüzeyine normale görece  $\theta$  açısıyla gelen güneş ışınımı için, atmosferde alınan yol uzunluğu  $l$ ,

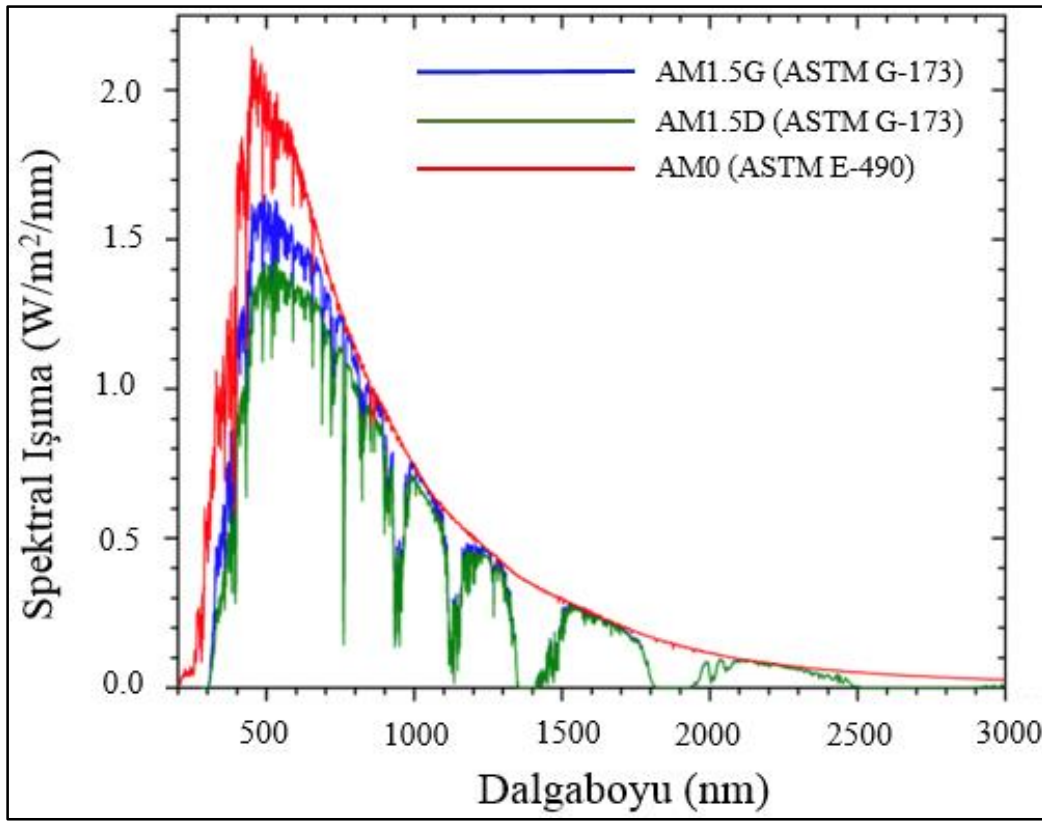
$$l = \frac{l_0}{\cos \theta} \quad (3.1)$$

ile verilir.  $l/l_0$  oranı, AM katsayısı olarak adlandırılır [57]. Hava kütlesi  $m$  ( $AMm$ ), atmosferde alınan yolun ( $l$ ), en kısa yola ( $l_0$ ) oranı olarak ifade edilir. Yani Şekil (3.2b)'de gösterildiği gibi,  $m=l/l_0$ 'dır.  $l=l_0 \sec \theta$  olduğu için,  $AMm$ ;  $AM \sec \theta$  olarak ifade edilir. Yeryüzüne ulaşan ışınım şiddetinin miktarı, güneşin pozisyonuna bağlı olarak değişir. Bu yüzden, gün ve yıl içinde güneşin pozisyonuna göre üzerine düşen ışınım şiddeti  $\cos \theta$ 'ya bağlı olarak değişime uğrayacaktır. Güneş hücresinin verimini artırmak için güneş hücresinin güneşe doğru yönelmesi güneş ışınlarının olabildiğince fazla toplanmasına imkan sağlar.

Şekil (3.2c)'de gösterildiği gibi; güneş ışınları, doğrudan ve saçılmaya uğrayarak yeryüzüne ulaşabilir. Saçılmaya uğrayan ışınlar, yeryüzüne gelen güneş ışınlarının şiddetini azalttığı gibi rastgele açılarda gelmesine de sebep olur. Bu durumda; yeryüzüne ulaşan ışığın hem doğrudan hem de saçılmış bileşenleri vardır [56].

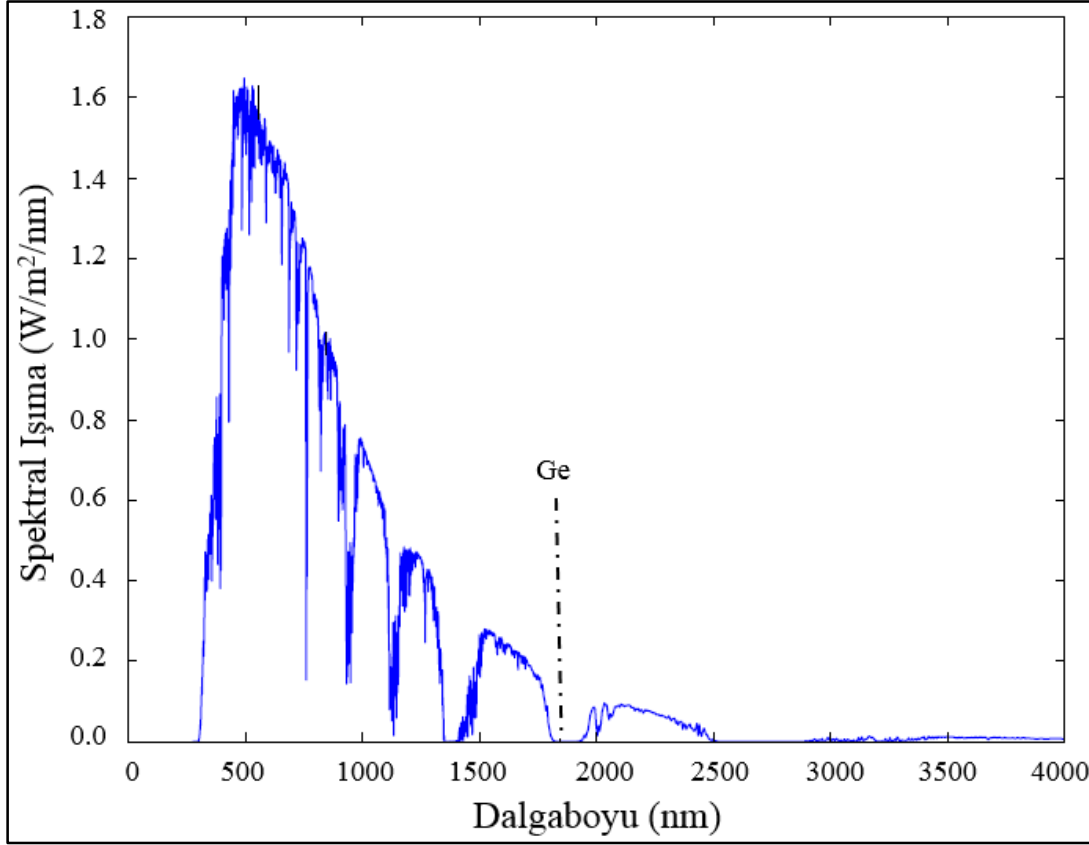
Bir güneş hücresinin performansı, üzerine düşen ışığın spektral dağılımına bağlı olduğu kadar şiddetine de bağlıdır. Bu yüzden, güneş hücreleri arasında kıyaslama yapmak için aynı spektrum altındaki davranışları incelenmelidir [56]. Şekil (3.3)'te verilen spektrumlar, güneş hücresi karakterizasyonu için kullanılan, Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials-ASTM) tarafından belirlenen standart referans spektrumlarıdır [18,56,59]. Yüksek performanslı güneş hücresi tasarlanması hedefleniyorsa; güneş hücresi tasarımının ilgili spektruma göre geliştirilmesi gereklidir [56]. Atmosfer dışında spektrum,  $AM0$  ile belirtilir [21,22,56,57,60].  $AM0$  spektrumu, güneş değişmezi olarak tanımlanır ve  $1353 \text{ W/m}^2$  ışınım yoğunluğuna sahiptir [21,22,57]. Uzay uygulamalarında kullanılan güneş hücrelerinin performanslarının belirlenmesi için  $AM0$  standart referans spektrumu kullanılır [22,56]. Bu ışınım, güçlü bir şekilde standart kara cisim ışımasına benzer [60]. Güneş ışınları en kısa mesafeyi dik olarak dünya yüzeyine ulaştıklarında alırlar. Bu spektrum,  $AM1$  spektrumu olarak tanımlanır.  $AM1$  spektrumunun

ışınım yoğunluğu,  $925 \text{ W/m}^2$ 'dir [22]. Dünyanın yüzeyine yüzey normaliyle  $48,2^\circ$ 'lik bir açıyla gelen güneş ışınımı, *AM1,5* olarak tanımlanır [21,22,56,57,60]. *AM1,5* spektrumu, karasal uygulamalarda kullanılan güneş hücrelerinin performanslarının belirlenmesi için standart spektrum olarak dikkate alınır [57]. Doğrudan yani saçılmadan dünya yüzeyine gelen güneş ışınları, *AM1,5D* ile temsil edilir [22,56]. Hem doğrudan hem de atmosferde saçıldıktan sonra dünyanın yüzeyine ulaşan güneş ışınları, *AM1,5G* ile temsil edilir [22,56]. *AM1,5G* ve *AM1,5D* spektrumları için ışınım yoğunlukları sırasıyla yaklaşık olarak  $1000$  ve  $900 \text{ W/m}^2$  olarak ifade edilir [22,56,57,60].



Şekil 3.3. Standart referans spektrumları [59]

Şekil (3.4), *AM1,5G* standart referans spektrumunu ve Ge yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığının güneş spektrumundaki pozisyonunu gösterir [60]. *Ge*'nin kızılötesi soğurumuna uzaştığı, Şekil (3.4)'ten görülmektedir. *Ge* yaklaşık olarak  $1800 \text{ nm}$ 'ye kadar ışınım soğurabilir [60].



Şekil 3.4. *AM1,5G* standart referans spektrumu ve Ge yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığının güneş spektrumundaki pozisyonu [60]

### 3.2. Fotovoltaik (PV) Fiziği

Güneş hücreleri, gelen güneş ışınımı enerjisini doğrudan elektriksel enerjiye dönüştürebilen ve bir yüke iletebilen p-n eklem tabanlı yarıiletken aygıtlardır [22,61,62]. Bu yüzden, p-n eklem aydınlatma altındaki davranışının incelenmesi, güneş hücrelerinin çalışma prensibinin anlaşılması açısından oldukça önemlidir [63]. Bir p-n eklemi, bir n-tipi yarıiletken ve bir p-tipi yarıiletken malzemenin kontak haline getirilmesiyle oluşur [61,63-65]. p-n eklemler, ya homo-eklem ya da hetero-eklem olabilir [62]. Eğer eklem n-tipi ve p-tipi bölgeleri aynı yarıiletken malzemeden meydana getirilirse (örneğin; n-tipi Ge ve p-tipi Ge) eklem, homo-eklem; farklı yarıiletken malzemelerden meydana getirilirse (örneğin; n-tipi Si ve p-tipi Ge) eklem, hetero-eklem olarak adlandırılır [63-65].

Bir yarıiletken malzeme yüzeyine çarpan bir foton, ya malzeme yüzeyinden yansıtılabilir, ya malzeme içinde soğurulabilir ya da malzemede soğurulmadan malzeme içinden geçebilir [66]. Güneş ışığındaki temel parçacıklar fotonlardır. Bir fotonun enerjisi  $E$ ,

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir. Eşitlikte;  $h$ , Planck sabitini;  $\nu$ , foton frekansını;  $c$ , ışık hızını ve  $\lambda$ , foton dalgaboyunu simgeler [66-68]. Eğer foton yansımaya uğramamışsa, yani malzeme içine nüfuz etmişse, malzemenin enerji-bant aralığı  $E_g$  değerine bağlı olarak ya soğurulur ya da malzemenin içinden geçirilir [67]. Eğer bu foton yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığı değerine eşit ya da ondan daha büyük bir enerjiye sahipse, yarıiletken malzeme tarafından soğurulur, bu durum yarıiletken malzeme içinde negatif ve pozitif yük taşıyıcı yani elektron-hol (e-h) çifti üretimine sebep olur [66,67]. Eğer bu foton yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığı değerinden daha düşük bir enerjiye sahipse, yarıiletken malzeme tarafından soğurulamaz ve malzemenin içinden geçer [66,67].

Yarıiletkenlerde ışık soğurumu, güçlü bir şekilde dalgaboyuna bağlıdır ve soğurma katsayısı  $\alpha(\lambda)$  ya da soğurma uzunluğu (nüfuz etme derinliği)  $L(\lambda)$  ile tanımlanır.  $\alpha(\lambda)$  ve  $L(\lambda)$  arasındaki ilişki,

$$L(\lambda) = \frac{1}{\alpha(\lambda)} \quad (3.3)$$

ile verilir. Işığın soğurmak için gerekli malzeme kalınlığı, çoğunlukla ışığın malzeme içine nüfuz etme derinliği ile belirlenir [67].

### 3.3. Güneş Hücresi Çalışma Prensibi

Eklem aydınlatıldığında, hem uzay-yükü bölgesinde hem de uzay-yükü bölgesi dışında kalan quasi-nötr bölgelerde e-h çiftleri üretilir [69]. Üretilen elektron ve holler difüzyon uzunlukları kadar eklemde yol alırlar ve uzay-yükü bölgesi taşıyıcıların difüzyon uzunlukları içindeyse; taşıyıcılar elektrik alan tarafından süpürülecekleri uzay-yükü bölgesine girebilirler [56]. Uzay-yükü bölgesi ve azınlık taşıyıcıların difüzyon uzunluklarının toplamı aygıtın aktif bölgesini meydana getirir. Aktif bölgede foton-sebepli üretilmiş taşıyıcılar çoğunluk taşıyıcı bölgelerine süpürülür ve o suretle aygıttan akım geçer [56]. Uzay-yükü

bölgesinde üretilen taşıyıcılar, hızlı bir şekilde bu bölgedeki elektrik alan tarafından süpürülürler. Elektronlar n- tarafına doğru ve holler p- tarafına doğru hareket ederler. Quasi-nötr bölgelerde üretilen taşıyıcılar arasında difüzyon uzunluğu içinde olanlar, uzay-yükü bölgesine ulaşabilir ve ardından diğer tarafa çekilecektirler [69,70]. Yalnızca azınlık taşıyıcılar uzay-yükü bölgesini geçecektir [69]. Nötr bölgelerde üretilen azınlık taşıyıcılar uzay-yükü bölgesine ulaşmak zorundadır [63]. p- tarafından elektronlar n- tarafına, n- tarafından holler p- tarafına doğru akacaklardır [69]. Bu nötr n-tipi ve nötr p-tipi bölgelerde üretilen e-h çiftlerinin üretildikleri bölgelerde azınlık olan taşıyıcıları (n- tarafında üretilenlerin holleri ve p- tarafında üretilenlerin elektronları), rekombine olmadan önce yalnızca malzemeye ait olan azınlık taşıyıcı ömrü kadar var olabilirler. Kısacası, aygıtta akım akarken, buldukları bölgelerde azınlık olan taşıyıcılar yarı kararlıdır ve rekombinasyona uğramadan önce yalnızca azınlık taşıyıcı ömrüne eşit bir zaman dilimi boyunca var olurlar [71]. Yükler rekombine olur olmaz, üretilen e-h çiftleri kaybolur ve bu sebeple dış devrede toplanan akıma katkı sağlanamaz. Kısacası, quasi-nötr bölgelerde üretilen e-h çiftleri, rekombine olmadan uzay-yükü bölgesine varırsa, uzay-yükü bölgesinde var olan elektrik alan tarafından ayrılırlar [63,67]. e-h çiftlerinin ayrılması işlemi,  $V_{bi}$  dahili yerleşik potansiyeli altında, elektronların n-tipi bölgeye ve hollerin p-tipi bölgeye çekilmesi ile meydana gelir [63,67]. Böylece, elektronlar ve holler eklemdeki elektrik alan altında farklı yönlere doğru ayrılarak taşıyıcı rekombinasyonu da önlenmiş olur [63]. Gerçekleşen bu olaylar sonucunda, n- tarafında negatif yükte net bir artış ve p- tarafında pozitif yükte net bir artış meydana gelir. Eklem üzerine düşen ışık nedeniyle meydana gelen bu durum, p-n eklemi üzerinde ortaya çıkan bir potansiyele neden olur ve fotovoltaik etki olarak bilinir [63,69]. Bu yolla, taşıyıcılar p-n eklem alanı boyunca çoğunluk taşıyıcı oldukları yerde biriktirilirler. Güneş hücresinin kontaklarının kısa devre ya da dış bir yük üzerinden birbirlerine bağlı olduğu anda, hücre güneş ışığına maruz kalırsa; elektronlar ve holler kendi elektrotlarına toplanılmak üzere hareket ederler ve dış devre boyunca akabilirler, bu fotoakım  $I_L$  olarak bilinir [63,72,73]. Gerçekleşen süreç sonunda, hücre tarafından soğurulan fotonların enerjilerinin fotoakıma dönüştüğü görülür [63]. Fotoakım  $I_L$ ,

$$I_L(V) = -qA \int G(z) \eta_c(z, V) dz \quad (3.4)$$

olarak verilir. Eşitlikte;  $q$ , elementel yük;  $A$ , güneş hücresinin alanı;  $G(z)$ , taşıyıcı üretim fonksiyonu ve  $\eta_c(z, V)$  ise toplama (biriktirme) olasılığı olarak ifade edilir. Toplama olasılığı

$\eta_c$ , p-n eklemının belli bir bölgesinde bir fotonun soğurulması ile üretilen bir taşıyıcının toplanması olasılığı olarak tanımlanır. Toplama olasılığı, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu  $L$ 'nin bir fonksiyonu olarak, üretim noktasının uzay-yükü bölgesinden uzaklığının artması ile üstel olarak azalır [18]. Elektrik alan, e-h çiftlerini etkin bir şekilde ayırdığından dolayı, toplama olasılığı uzay-yükü bölgesinde maksimumdur. Quasi-nötr bölgede, difüzyon baskın mekanizmadır. Bu bölgelerde, yalnızca uzay-yükü bölgesinden azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğundan ( $L_{n,p}$ ) daha az olan bir uzaklıkta üretilen taşıyıcılar toplanabilir. Azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu, bir taşıyıcının üretildiği noktadan, rekombine olana kadar hareket edebildiği ortalama uzaklık olarak tanımlanır [63,66]. n- tarafında negatif yükte net bir artışın ve p- tarafında pozitif yükte net bir artışın meydana gelmesi, güneş hücresinde aydınlatma ile uyarılmış ileri beslemeye neden olur. Harici yüklerin bulunduğu bu beslem neticesinde, foton-sebepli üretilmiş akıma ters yönde bir akım oluşur. Karanlık akım olarak tanımlanan bu akımın minimize edilmesi gerekir [22].

#### 4. ANALİTİK GÜNEŞ HÜCRE MODELİ

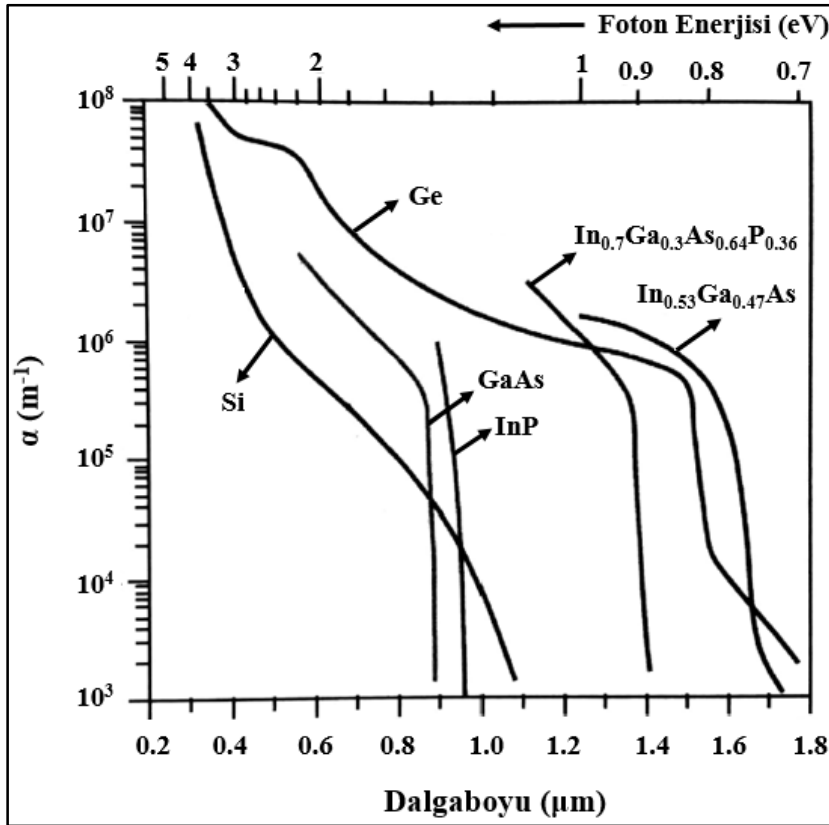
Analitik güneş hücre modeli, verilen bir ışık spektrumuna göre bir güneş hücresinin fotocevabının hesabı için ihtiyaç duyulan hem azınlık hem de çoğunluk taşıyıcılar için süreklilik ve akım denklemlerini ve poisson denklemini içeren beş diferansiyel denklem kümesinin çözümünü içermektedir [22,43]. Bu çözüm güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$ , karanlık akım yoğunluğu  $J_k$ , ters doyum akım yoğunluğu  $J_0$ , açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , dolum faktörü  $FF$  ve enerji dönüşüm verimi  $\eta$  gibi parametrelerin teorik olarak hesaplanmasında kullanılır [22].

Güneş hücreleri, yarıiletken malzemelerden oluşturulan opto-elektronik aygıtlardır [43]. Güneş hücresinin çalışma prensibi, fotonların soğurulmasıyla e-h çiftlerinin oluşması ve oluşan elektron ve hollerin elektrik enerjisi üretmek üzere dış devrede akımları esasına dayanır [56]. Bir güneş hücresi güneş ışığına maruz kaldığında; foton yansınması, foton soğurumu, soğurma sonucunda serbest yük taşıyıcı üretimi (e-h çifti üretimi), üretilen serbest yük taşıyıcıların hareketi ve son olarak uzay-yükü bölgesinde oluşan elektrik alan vasıtasıyla üretilen serbest yük taşıyıcıların birbirlerinden ayrılması gibi başlıca olaylar meydana gelir. Temel yarıiletken özellikleri, verilen bir güneş hücresi tasarımında bu işlemin ne kadar etkili bir şekilde yürütüleceğini koşullandırır [43].

- Yarıiletken malzemenin bant aralığına bağlı olan soğurma katsayısı,
- Şekil ve yansımaya önleyici kaplama gibi yüzeyin son durumuna bağlı olan yarıiletken yüzeyin yansıtıcılığı,
- Serbest yük taşıyıcıların toplanma eklemine doğru hareketini kontrol eden sürüklenme-difüzyon parametreleri (elektron ve holler için taşıyıcı ömür süreleri ve mobiliteler),
- Azınlık taşıyıcıların rekombine oldukları güneş hücresi yüzeylerindeki yüzey rekombinasyon hızları, bu özelliklerin en önemlileri arasında gösterilebilir [22,43].

#### 4.1. Soğurma Katsayısı

Güneş hücresi malzemesinde hem soğurma hem de üretim süreçleri meydana geldiğinden dolayı; yarıiletken malzemenin bant aralığı ve spektral soğurma katsayısı, malzeme seçiminde dikkate alınması gereken unsurlardır [56]. Güneş ışığının yarıiletken malzeme içinde soğurulmadan önce aldığı mesafenin bir ölçüsü olan soğurma katsayısı  $\alpha$ , yarıiletken malzemenin özelliklerine bağlıdır [22,56].



Şekil 4.1. Foton enerjisine bağlı olarak bazı yarıiletken malzemelerin soğurma katsayıları [56]

Çeşitli yarıiletkenler için; soğurma katsayısının dalga boyuna (foton enerjisine) bağlılığı, Şekil (4.1) ile gösterilebilir [56]. Soğurma katsayısı, gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin bant aralığı değerinin hemen altında hızla sıfıra düşer. 0,67 eV bant aralığı değerine sahip olan Ge yarıiletken malzemesi için ~1800 nm'den itibaren soğurma katsayısı sıfıra düşer. Gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin enerji-bant aralığı değerinden çok daha büyükse, soğurma katsayısı  $\alpha$  büyük olup; foton yüzeye yakın bölgede soğurulur [56].  $\alpha$  değeri büyükse; fotonlar yüzeyden kısa bir mesafe içinde soğurulurken,  $\alpha$  değeri küçükse; fotonlar malzeme

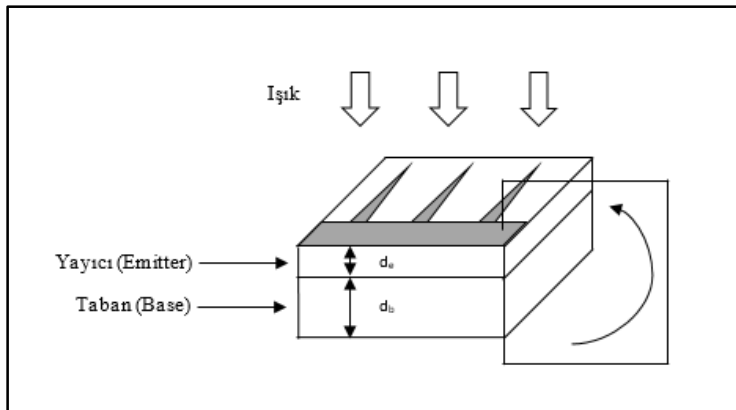
içinde daha uzun mesafeler alabilir [43]. Soğurma katsayısı  $\alpha$ 'nın sıfır olduğu sınır durumunda; fotonlar malzemeyi tamamen geçebilirler [43]. Örneğin; Ge, soğurma katsayısının hızla sıfıra düştüğü  $\sim 1800 \text{ nm}$ 'den itibaren daha uzun dalgaboylu fotonları soğuramaz, bu fotonlara geçirgenlik gösterir yani bu fotonlar için saydamdır [43].

## 4.2. Yansımaya

Bir güneş hücresi yüzeyinin yansıtıcılığı, yüzey dokusuna ve kullanılan yarıiletken malzemelerin kırıcılık katsayılarının yansımaya önleyici kaplamalar vasıtasıyla havaya adaptasyonuna bağlıdır. Verilen bir dalgaboyunda yansımayı en aza indirmek için ihtiyaç duyulan en uygun kırıcılık indisi değeri, bitişik iki tabakanın kırıcılık katsayılarının geometrik ortalaması olmak zorundadır. Uygun bir yansımaya önleyici tasarımı kullanılırsa, büyük ilerlemeler elde edilebilir. Daha fazla foton güneş hücresi tarafından soğurulur ve böylece elektrik üretimine katkı sağlanmış olur [22,43].

## 4.3. Kısa Devre Akım Yoğunluğu

Bir güneş hücresi, güneş hücresine ait iki kısmın yayıcı (emitter) ve taban (base) olarak tanımlandığı Şekil (4.2)'de gösterilen geometri ile şematik olarak betimlenebilir. Yayıcı tabaka olarak ifade edilen üst kısım, taban tabaka olarak ifade edilen alt kısma nazaran daha incedir. Güneş ışığı, güneş hücresine genellikle metal bir elektriksel ızgara kontak ile yalnızca kısmi bir şekilde kaplanan yayıcı yüzey tarafından çarpar. Bu durum, metal ızgara ile kaplanmayan alanlarda yüzeyin çoğu kısmı düşük bir yansımaya katsayısına sahip olduğundan dolayı; foton-sebepli üretilen akımın toplanmasına izin verir [43].



Şekil 4.2. Tek eklemli bir güneş hücresinin şematik gösterimi [43]

Şekil (4.2)'den görülebileceği gibi; güneş hücresi aydınlatıldığında, yayıcı tabaka n-tipi ve taban tabaka p-tipi yarıiletken malzeme olması şartıyla, dış elektrik kısa devresinde belirtilen yönlü (ok-yönünde) bir fotoakım üretilir. Yayıcı tabaka p-tipi, taban tabaka n-tipi bir yarıiletken malzemedir; Şekil (4.2)'de belirtilen yönün zıttı yönde bir fotoakım üretilir [22,43].

Güneş spektrumunun tüm dalgalı boyları güneş hücresi yüzeyine düştüğünden dolayı, güneş hücresi tarafından üretilen toplam kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}(\lambda)$ ; yayıcı tabaka ve taban tabaka kısa devre akım yoğunluklarının dalgalı boyu üzerinden integrallerinin toplamı olarak tanımlanır ve

$$J_{SC}(\lambda) = \int_0^{\infty} J_{SC\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} (J_{SCE\lambda} + J_{SCB\lambda}) d\lambda \quad (4.1)$$

eşitliği ile verilebilir. Eşitlikte;  $J_{SCE\lambda}$ , yayıcı tabakanın spektral kısa devre akım yoğunluğunu ve  $J_{SCB\lambda}$ , taban tabakanın spektral kısa devre akım yoğunluğunu temsil eder. Hem yayıcı tabaka hem de taban tabaka spektral kısa devre akım yoğunluğu için analitik ifadeler;

$$J_{SCE}(\lambda) = \frac{q\alpha\phi_0(1-R)L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} \left[ \frac{S_p \frac{L_p}{D_p} + \alpha L_p - e^{-\alpha d_e} \left( S_p \frac{L_p}{D_p} \cosh \frac{d_e}{L_p} + \sinh \frac{d_e}{L_p} \right)}{S_p \frac{L_p}{D_p} \sinh \frac{d_e}{L_p} + \cosh \frac{d_e}{L_p}} - \alpha L_p e^{-\alpha d_e} \right] \quad (4.2)$$

$$J_{SCB}(\lambda) = \frac{q\alpha\phi_0'(1-R)L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \left[ \alpha L_n - \frac{S_n \frac{L_n}{D_n} \left( \cosh \frac{d_b}{L_n} - e^{-\alpha d_b} \right) + \alpha L_n e^{-\alpha d_b} + \sinh \frac{d_b}{L_n}}{S_n \frac{L_n}{D_n} \sinh \frac{d_b}{L_n} + \cosh \frac{d_b}{L_n}} \right] \quad (4.3)$$

olarak verilebilir. Eşitliklerdeki temel parametreler ve birimleri, Çizelge 4.1'de verilir.

Çizelge 4.1. Analitik modelde içeren temel parametreler [43]

<i>Sembol</i>	<i>İsim</i>	<i>Birim</i>
$\alpha$	<i>Soğurma Katsayısı</i>	$cm^{-1}$
$\phi_0$	<i>Yayıcı Yüzeydeki Spektral Foton Akısı</i>	$Foton/cm^2\mu m$
$\phi_0'$	<i>Taban-Yayıcı Arayüzeydeki Spektral Foton Akısı</i>	$Foton/cm^2\mu m$
$L_n$	<i>Taban Tabakadaki Elektron Difüzyon Uzunluğu</i>	$cm$
$L_p$	<i>Yayıcı Tabakadaki Hol Difüzyon Uzunluğu</i>	$cm$
$D_n$	<i>Taban Tabakadaki Elektron Difüzyon Katsayısı</i>	$cm^2/s$
$D_p$	<i>Yayıcı Tabakadaki Hol Difüzyon Katsayısı</i>	$cm^2/s$
$S_p$	<i>Yayıcı Yüzeyi Hol Rekombinasyon Hızı</i>	$cm/s$
$S_n$	<i>Taban Yüzeyi Elektron Rekombinasyon Hızı</i>	$cm/s$
$R$	<i>Yansıma Katsayısı</i>	---

Modellenen güneş hücresinin yayıcı ve taban tabaka spektral kısa devre akım yoğunluklarının teorik olarak belirlenebilmesi için, yayıcı yüzeyindeki ve taban-yayıcı arayüzeyindeki dalgalı boyunun fonksiyonu olan spektral foton akıları hesaplanması gereken parametreler arasındadır. Foton akısı, saniyede birim yüzeye gelen foton sayısı olarak ifade edilir. Foton akısı, güneş hücresinde oluşturulacak olan elektron ve hol sayısının, dolayısıyla güneş hücresinin üreteceği akım miktarının belirlenmesi açısından önem teşkil eder [56]. Bir güneş hücresinin yayıcı yüzeyindeki spektral foton akısı  $\phi_0$ , spektral parlaklık  $I_\lambda$ 'nın birim alan ve birim dalgalı boyu başına güç olduğunu hesaba katarak, spektral parlaklık ve dalgalı boyu  $\lambda$  ile kolaylıkla ilişkilendirilir [43]. Yayıcı yüzeyindeki spektral foton akısı  $\phi_0$ ,

$$\phi_0 = \frac{\lambda}{hc} I_\lambda \quad (4.4)$$

olarak ifade edilebilir [22,43]. Belli bir dalgalı boyundaki güç yoğunluğu olarak ifade edilen spektral parlaklık  $I_\lambda$ , bir ışık kaynağını karakterize etmenin en yaygın yöntemidir [56]. Yayıcı-taban eklemi ya da ara yüzeyindeki spektral foton akısı değeri  $\phi_0'$  için, yayıcı tabakasındaki meydana gelmiş soğurmanın hesaba katılması zorunlu olduğundan dolayı; akım yoğunluğunun taban bileşeni,  $\phi_0$ 'ın yerine  $\phi_0'$ 'ne bağlıdır.  $\phi_0'$ ,  $\phi_0$  ile ilişkilidir ve

$$\phi_0' = \phi_0 e^{-\alpha d_e} \quad (4.5)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. Eşitlikteki  $d_e$ , yayıcı tabakanın kalınlığını simgeler ve birimi  $cm$ 'dir [43].

Spektral kısa devre akım yoğunluklarının teorik olarak hesaplanabilmesi için, yayıcı ve taban tabakalardaki azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluklarının da belirlenmesi gerekir [22,74]. Yayıcı tabakadaki hol azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu  $L_p$  ve taban tabakadaki elektron azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu  $L_n$  ifadeleri,

$$D_{p,n} = \mu_{p,n} \frac{kT}{q} \quad (4.6)$$

ve

$$\tau_{p,n} = \frac{1}{BN_{d,a}} \quad (4.7)$$

olmak üzere;

$$L_{p,n} = \sqrt{\tau_{p,n} D_{p,n}} \quad (4.8)$$

eşitlikleri ile verilebilir [22]. Burada;  $\tau_p$  ve  $\tau_n$ , sırasıyla yayıcı tabakadaki hol ve taban tabakadaki elektron için azınlık taşıyıcı ömür süreleri;  $N_d$  ve  $N_a$ , sırasıyla yayıcı tabakadaki verici ve taban tabakadaki alıcı konsantrasyonları; B, ışımali rekombinasyon katsayısı ve  $\mu_p$  ile  $\mu_n$ , sırasıyla hol ve elektron mobiliteleri olarak ifade edilir [22,74-76].

#### 4.4. Karanlık Akım Yoğunluğu

Karanlık  $I$ - $V$  eğrisi, tamamen geleneksel diyot karakteristiğine benzer [43]. Bir güneş hücresinin karanlık akım yoğunluğu,  $J_k$ , ters doyum akım yoğunluğu  $J_0$  ile ilişkilidir ve

$$J_k = J_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (4.9)$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlikte;  $V$ , uygulanan gerilimi;  $k_B$ , Boltzman sabitini ve  $T$ , sıcaklığı simgeler. Bir güneş hücresinin ters doyum akım yoğunluğu  $J_0$ , yayıcı tabaka ters doyum akım yoğunluğu  $J_{0E}$  ile taban tabaka ters doyum akım yoğunluğu  $J_{0B}$  'nin toplamı olarak ifade edilebilir ve

$$J_{0E} = q \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{L_p} \left[ \frac{\left( S_p \frac{L_p}{D_p} \cosh \frac{d_e}{L_p} + \sinh \frac{d_e}{L_p} \right)}{S_p \frac{L_p}{D_p} \sinh \frac{d_e}{L_p} + \cosh \frac{d_e}{L_p}} \right] \quad (4.10)$$

ve

$$J_{0B} = q \frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_n}{L_n} \left[ \frac{S_n \frac{L_n}{D_n} \cosh \frac{d_b}{L_n} + \sinh \frac{d_b}{L_n}}{\cosh \frac{d_b}{L_n} + S_n \frac{L_n}{D_n} \sinh \frac{d_b}{L_n}} \right] \quad (4.11)$$

olmak üzere;

$$J_0 = J_{0E} + J_{0B} \quad (4.12)$$

eşitliği ile verilebilir. Eşitliklerdeki  $d_b$ , taban tabakası kalınlığını simgeler ve birimi  $cm$ 'dir.

Ters doyum akım yoğunluğu  $J_0$  eşitliklerinden görülebileceği gibi, açık bir şekilde doğrudan herhangi bir ışık parametresine bağlı değilken, yarıiletken malzeme taşıyıcı parametreleriyle ve aygıt performansı açısından çok önemli bir parametre olan özgün taşıyıcı konsantrasyonu  $n_i$  ile doğrudan ilişkilidir. Bir yarıiletken malzemenin özgün taşıyıcı konsantrasyonu  $n_i$ , yarıiletkenin iletkenlik ve değerlik bantlarındaki etkin durum yoğunluklarına ve enerji-bant aralığı değerine bağlı olan bir parametredir. Bu durum, PV'lerde kullanım ilgisi duyulan yarıiletken malzemeleri için özgün taşıyıcı konsantrasyonu değerlerinde büyük farklar oluşturur. Ters doyum akım yoğunluğunun özgün taşıyıcı konsantrasyon değerinin karesine bağlı olduğu dikkate alınır; farklı yarıiletken malzemeleri arasında  $J_0$  değerlerindeki farklar birkaç merteye büyüklüğünde olabilir. PV dönüşümündeki birkaç önemli büyüklüğün, soğurma katsayısı, yansıma katsayısı, mobilite, ömür süresi ve özgün taşıyıcı konsantrasyonu gibi yarıiletken malzeme özelliklerine bağlı olduğu görüldü. Belki de özgün taşıyıcı konsantrasyonu değeri, güneş hücrelerinin PV cevabında önemli değişkenlikler üreten çok ciddi farkların bulunduğu yerdir [43]. Özgün taşıyıcı konsantrasyonu  $n_i$ ,

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = \left[ \left[ 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \left[ 2 \left[ \frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \right] \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (4.13)$$

eşitliği ile verilebilir. Eşitlikte;  $N_c$  ve  $N_v$ , sırasıyla iletkenlik ve değerlik bandındaki etkin durumların yoğunluğunu temsil eder [28].

#### 4.5. Kısa Devre Akım Yoğunluğu-Gerilim ( $J$ - $V$ ) Karakteristiği

Bir güneş hücresinin toplam  $J$ - $V$  karakteristiği, güneş altında üretilen akım yoğunluğu ile karanlık durum altındaki  $J$ - $V$  karakteristiğinin süperpozisyonu olarak ifade edilebilir.  $J$ - $V$  karakteristiği, güneş hücresinin performansı ve kalitesi hakkında bilgi verir [22,43,77].

$J$ - $V$  karakteristik denklemi güneş hücresinin akım yoğunluğu  $J$  ve gerilimi  $V$  arasındaki ilişki ile aygıtın elektriksel parametrelerini açıklayan analitik bir ifadedir [22]. Kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$  ve karanlık akım yoğunluğu  $J_k$  için analitik ifadelerin verilmesinin ardından; bir güneş hücresinin  $J$ - $V$  karakteristiği,

$$J = J_{SC} - J_k \quad (4.14)$$

olarak ifade edilebilir. Eş.(4.9) ile verilen karanlık akım yoğunluğu ifadesi, Eş.(4.14)'te yerine yazılırsa;  $J$ - $V$  karakteristiği,

$$J = J_{SC} - J_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (4.15)$$

olarak elde edilir [22,43,77].

Bir güneş hücresi tarafından üretilen akım değeri  $I$ ,

$$I = I_{SC} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (4.16)$$

olarak verilebilir. Burada; kısa devre akımı  $I_{SC}$  ve ters doyum akımı  $I_0$ , ilgili akım yoğunlukları  $J_{SC}$  ve  $J_0$  ile ilişkili olup;

$$I_{SC} = AJ_{SC} \quad (4.17)$$

ve

$$I_0 = AJ_0 \quad (4.18)$$

olarak ifade edilir. Eşitliklerdeki  $A$ , aygıtın alanını simgeler [77].

Bir güneş hücresinin performansı, hücrenin kısa devre akımı  $I_{SC}$  (kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$ ), açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , dolum faktörü  $FF$  ve enerji dönüşüm verimi  $\eta$  parametreleri tarafından belirlenir.

Kısa devre akımı  $I_{SC}$ , güneş hücresinin uçları kısa devre yapıldığında (yani  $V=0$  olduğunda); güneş hücresi tarafından üretilen maksimum akımdır ve gelen fotonların miktarına bağlıdır [61,63,66,67,69,70,72]. Kısa devre durumunda  $V=0$  olduğundan dolayı; herhangi bir güç çıkışı yoktur ( $V=0$  için;  $P=IV=0$ ) [63,72]. Kısa devre akımı  $I_{SC}$ , idealde, üretilen fotoakım  $I_L$ 'ye eşittir ( $I_{SC} \approx I_L$ ) [18,28,41,63]. Kısa devre akımı  $I_{SC}$ 'yi etkileyen faktörler genellikle, ışık şiddeti, hücrenin optik özellikleri, p-n eklem kalınlığı ve toplama olasılığıdır [66]. Güneş hücresinin kısa devre akımı  $I_{SC}$  parametresi, soğurucu malzemenin enerji-bant aralığına güçlü bir şekilde bağlıdır. Büyük enerji-bant aralıklı yarıiletken bir malzeme, düşük enerji-bant aralıklı yarıiletken malzemelere kıyasla daha az miktarda foton soğurur. Bu yüzden; kısa devre akımı  $I_{SC}$ , enerji-bant aralığındaki azalmayla artar [69].

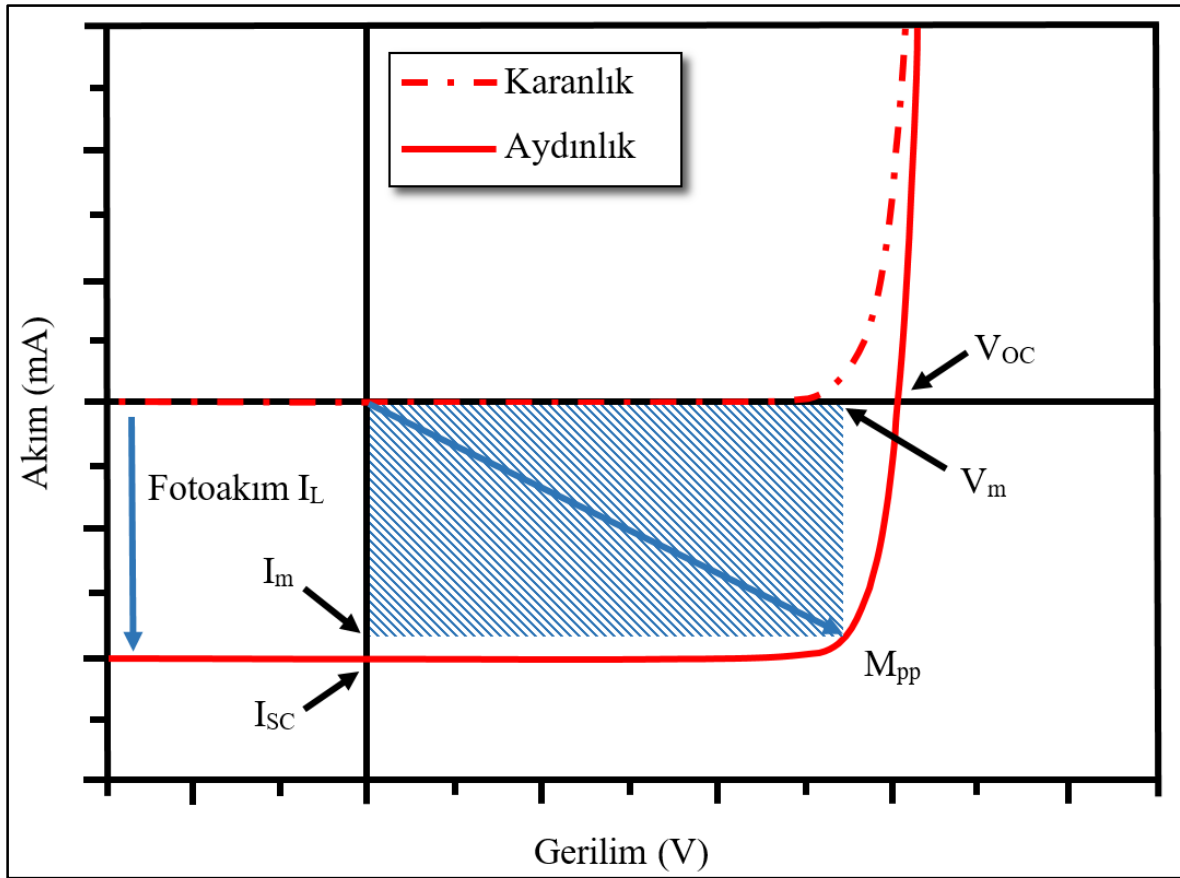
Açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , bir güneş hücresinden elde edilen maksimum gerilimdir [28,69]. Açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , güneş hücresi açık bir devre durumundayken yani güneş hücresinden akım çekilmediği anda (yani  $I=0$  olduğunda); güneş hücresinin uçları arasındaki gerilimdir [27,63,69]. Açık devre durumunda bu seferde  $I=0$  olduğundan dolayı; yine herhangi bir güç çıkışı yoktur ( $I=0$  için;  $P=IV=0$ ) [72]. Bir güneş hücresi açık devre durumunda olduğunda; akım, sıfıra eşittir [27]. Eş.(3.16)'da  $I=0$  alındığında; gerilim ifadesi, açık devre gerilimi  $V_{OC}$  olarak adlandırılır ve

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{SC}}{I_0} + 1 \right) \quad (4.19)$$

eşitliği ile verilebilir. Eş.(4.19)'dan; açık devre gerilimi  $V_{OC}$  değerinin,  $I_{SC}/I_0$  oranına logaritmik olarak bağlı olduğu görülebilir. Eş.(4.19)'da gösterilen sonuç, açık devre geriliminin güneş hücresi alanından bağımsız olduğunu işaret eder; bu durum hücre gerilimi aynı aydınlatma ve sıcaklık koşulları altında daima aynı olduğundan dolayı, önemli bir sonuçtur [22,77]. Eş.(4.19)'dan görüldüğü gibi; açık devre gerilimi  $V_{OC}$ 'nin maksimum değere sahip olabilmesi için ters doyum akımı  $I_0$ 'ın minimum değere sahip olması gerekir [22].

Yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığı değerinin büyük olması, soğurulan fotonların daha düşük termalizasyonuna sebep olduğundan, Fermi seviyelerinin daha yüksek

enerjilerde bölünmesine neden olur. Bu durumdan dolayı; aygıtta kullanılan yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığı değeri ne kadar büyükse, aygıtın üreteceği açık devre gerilimi  $V_{OC}$  değeri de o kadar büyük olur. Bunun yanı sıra, yukarıda belirtildiği gibi; enerji-bant aralığı değeri arttıkça, kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$ 'nin azaldığı da unutulmamalıdır [22,78]. Güneş hücresi tasarımlarında; uygun bant aralıklı malzeme seçimi, en iyi verim değerlerinin elde edilmesine sebep olabilir [22,71,78]. Tek eklemli bir güneş hücresi için en uygun enerji-bant aralığı değeri, yaklaşık %30 teorik bir enerji dönüşüm verimi elde edilmesine olanak sağlayan yaklaşık 1,4-1,5 eV'dir [71,78].



Şekil 4.3. Karanlık ve aydınlatma altında  $I$ - $V$  karakteristikleri [79]

Bir güneş hücresinden çıkartılabilen maksimum güç  $P_m$ , aydınlatma altındaki  $I$ - $V$  eğrisi ve dördüncü çeyrekteki eksenler arasında sığabilen en büyük dikdörtgenin alanına eşittir [72]. Bu dikdörtgenin kenarlarının uzunlukları, maksimum gerilim  $V_m$  ve maksimum akım  $I_m$  değerlerini verir [72]. Karanlık ve aydınlatma altında  $I$ - $V$  karakteristiklerinin verildiği Şekil (4.3)'te  $M_{pp}$  olarak verilen ifade, maksimum güç noktasını temsil eder [79]. Güneş hücreleri için önemli bir başka parametre,  $I$ - $V$  eğrisinin kareliğinin bir ölçüsü olan dolum faktörü

$FF$ 'dir [62,69,72]. Dolum faktörü  $FF$ , bir güneş hücresinden elde edilebilen maksimum gücün,  $I_{SC}$  ve  $V_{OC}$  değerlerinin çarpımına oranı olarak tanımlanır [69,77]. Dolum faktörü  $FF$ ,

$$FF = \frac{P_m}{I_{SC}V_{OC}} = \frac{I_m V_m}{I_{SC}V_{OC}} \quad (4.20)$$

olarak ifade edilebilir [62,63,69,72,79]. Dolum faktörü  $FF$ , kısa devre akımı  $I_{SC}$  ve açık devre gerilimi  $V_{OC}$  parametreleriyle beraber, bir güneş hücresinden elde edilebilen maksimum gücü belirleyen bir parametredir. Eş.(4.20)'den; maksimum güç  $P_m$  ifadesi,

$$P_m = I_{SC}V_{OC}FF \quad (4.21)$$

olarak elde edilir [69].

İdeal güneş hücrelerinin dolum faktörü  $FF$ ,

$$FF = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0,72)}{v_{OC} + 1} \quad (4.22)$$

eşitliği ile ifade edilir [79]. Eşitlikte;  $v_{OC}$ , normalize edilmiş açık devre gerilimi olarak tanımlanır ve

$$v_{OC} = \frac{V_{OC}}{V_T} \quad (4.23)$$

olarak ifade edilir. Burada;  $V_T$ , termal potansiyeldir ve

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (4.24)$$

eşitliği ile verilir [22]. Eş.(4.22), dolum faktörü  $FF$ 'nin maksimum mümkün değerini verir ve yalnızca açık devre gerilimi  $V_{OC}$ 'ye bağlıdır [28,39,79]. Dolum faktörü  $FF$  için ideal değer  $\%100$ 'dür. Bu değer,  $I-V$  eğrisi bir dikdörtgen olduğu zaman elde edilir [79]. Dolum faktörü  $\%100$  değerine yaklaşabilir, fakat ideal güneş hücrelerinde bile asla  $\%100$  değerine ulaşamaz [72,79].

Güneş hücrelerinin performansını kıyaslamak için genellikle kullanılan parametre enerji dönüşüm verimi  $\eta$ 'dır [22,69,77]. Bir güneş hücresinin enerji dönüşüm verimi  $\eta$ , güneş hücresi çıkış gücü (güneş hücresinden elde edilen maksimum güç)  $P_m$  ve güneş hücresi yüzeyine çarpan güneş gücü (güneş hücresi üzerine gelen güneş spektrumuna bağlı güç değeri)  $P_{in}$  arasındaki oran olarak tanımlanır ve

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{GA} = \frac{J_{sc} V_{oc} FF}{G} \quad (4.25)$$

olarak ifade edilir. Eş.(4.25)'ten görülebileceği gibi; verilen bir güneş spektrumu radyasyon yoğunluğu  $G$  için bir güneş hücresinin enerji dönüşüm verimi  $\eta$ , kısa devre akım yoğunluğu  $J_{sc}$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}$  ve dolum faktörü  $FF$  gibi üç temel fotovoltaiik parametre değeri ile orantılıdır [77].

Eşdeğer devresi modeli, genellikle p-n eklem güneş hücrelerinde deneysel verilere iyi bir şekilde fit olabilen aygıtın  $I-V$  karakteristiğini tanımlamak için araştırılır [79]. Şu ana kadar tarif edilen güneş hücresinin eşdeğer devresi, ideal bir diyot ve ideal bir akım kaynağına dayanan bir güneş hücresinin ideal davranışını hesaba katar. Bazen bu seviye bir model, güneş hücresi tarafından sağlanan maksimum gücü tam bir şekilde temsil etmek için yetersiz kalır. Hesaba katılmamış ve güneş hücresi cevabını etkileyebilecek çeşitli etkiler vardır. Pratik güneş hücrelerinde; parazit dirençler, önlenemez faktörlerdir. Bu yüzden; bu enerji kayıplarını açıklamak için seri direnç  $R_s$  ve şönt direnç  $R_{sh}$  eşdeğer devresi modeline yerleştirilir [77,79]. Kısacası; modelin ana sınırlamalarından biri, pratik güneş hücrelerinde bulunan seri direnç ve şönt direnç kayıplarından kaynaklanmaktadır [77]. Pratikte; az sayıda güneş hücresi  $I$ 'e eşit idealite katsayısı  $n$  ile tamamen ideal bir özellik sergiler. Bu yüzden; bu idealsizlikleri izah etmek için bir 'idealite faktörü  $n$ ' parametresi eklemekte yaygın bir uygulamadır. Diyotun idealite faktörü  $n$ , diyotun ideal diyot eşitliğini ne kadar yakından

takip ettiğinin ölçüsüdür [36,69,79]. Difüzyon diyotunun ideal olmaması, gerçek bir karanlık  $I(V)$  eğrisi ölçümünün Eş.(4.16)'nın karanlık kısmına tam olarak uymadığı anlamına gelir. Bu durum, üssün paydasında birden farklı olan bir 'diyot faktörü'  $n$ 'nin kullanılmasını gerektirir. Güneş hücrelerinin uzay-yükü bölgesindeki rekombinasyon, ideal güneş hücresi diyotunun doyum akımından farklı olan bir doyum akımı  $I_{02}$ 'li ve birden daha büyük (genellikle 2'ye eşit olduğu varsayılır) verilen bir idealite faktörlü ikinci bir diyot terimi ile bir eşdeğer devresinde temsil edilebilir. Özetle; bu etkiler hesaba katılarak, akım ve gerilim arasında yeni bir ilişki,

$$I = I_L - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_s}{nV_T}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V+IR_s}{2V_T}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (4.26)$$

olarak yazılabilir [77].

#### 4.6. Sıcaklık Etkisi

Çalışma sıcaklığı, güneş hücrelerinin elektriksel cevabı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Karasal uygulamalarda, güneş hücreleri  $60-65 \text{ } ^\circ\text{C}$ 'ye kadar kolayca ısınabilir. Uzay ya da uydu uygulamalarında; sıcaklıklar, daha yüksek değerlere bile ulaşabilir [77]. Güneş hücresi performansı üzerinde sıcaklığın etkisinin incelenmesi, teknolojik uygulamalar için önemli bir durumdur [22]. Örneğin; bir CPV sisteminde, güneş hücrelerinin çalışma sıcaklığı geniş biçimde değişebildiğinden ve ortam sıcaklığından çok daha yüksek olabildiğinden dolayı; sıcaklığın güneş hücre performansı üzerindeki etkisini kavrama gücü, CPV sistem tasarımı üzerinde düşünme açısından önemlidir [18].

Yarıiletken malzemelerin güneş hücreleri gibi teknolojik aygıtların temelini oluşturmasının sebebi, sahip oldukları enerji-bant aralıklarıdır [22]. Enerji-bant aralığı  $E_g$ , iletkenlik bandının en alt seviyesi  $E_C$  ile valans bandının en üst seviyesi  $E_V$  arasındaki enerji farkı olarak ifade edilir ve

$$E_g = E_C - E_V \quad (4.27)$$

ile verilir [22,80]. Yarıiletken malzemelerin enerji-bant aralığı değeri, sıcaklığa bağlı olarak değişir. Bir yarıiletkenin enerji-bant aralığının artan sıcaklıkla daralması, yarıiletken malzeme içindeki elektronların enerjisinin artması ile ilişkili olarak izah edilebilir. Sıcaklık arttığında atomlar arası mesafe artar ve bu sebeple bağ enerjisi azalır. Dolayısıyla; elektronların yarıiletken malzeme içinde maruz kalacakları periyodik potansiyelin büyüklüğü azalır ve sonuç olarak enerji-bant aralığı daralır [56].

Yarıiletkenlerin enerji-bant aralığı  $E_g$ ,

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (4.28)$$

eşitliği ile ifade edilir. Yarıiletkenlerin enerji-bant aralığı  $E_g$  değeri, Eş.(4.28) ile verilen Varshni'nin deneysel ifadesi ile tanımlandığı gibi artan sıcaklıkla azalma eğilimindedir. Eşitlikte;  $E_g(T)$ , yarıiletkenin  $T$  sıcaklığındaki doğrudan ya da dolaylı enerji-bant aralığı;  $E_g(0K)$ , enerji-bant aralığının  $T \approx 0K$  sıcaklığındaki değeri;  $\alpha$  ve  $\beta$  ise yarıiletken malzemesine bağlı sırasıyla termal genişleme ve Debye sıcaklığıyla ilgili olan Varshni katsayılarıdır [22,25,28,81]. Sıcaklık, güneş hücresi performansı üzerinde etkili olan fiziksel bir niceliktir. Sıcaklıkla kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$ 'deki değişim, birincil olarak sıcaklıkla enerji-bant aralığındaki değişimden kaynaklanır [28]. Güneş hücresinin  $J_{SC}$ 'si, esas olarak yarıiletken malzemenin enerji-bant aralığına dayanan optik soğurma kenarına bağlıdır [27]. Genellikle; pek çok yarıiletkende sıcaklık artarken enerji-bant aralığı azalır [28]. Artan sıcaklık enerji-bant aralığını daraltır; bu durum optik soğurma kenarını genişletir [27]. Böylece; güneş hücresi, güneş spektrumunda daha uzun dalgaboyu bölgelerine tepki verir, daha fazla foton-sebepli taşıyıcı üretilir ve bu sayede kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$  artar [22,25,27,28,39]. Güneş hücre performansını belirleyen parametrelerden açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , sıcaklık arttıkça azalır [18,22,25,28,56,73]. Açık devre gerilimi  $V_{OC}$ 'deki değişim, sıcaklığın artmasıyla yarıiletkenin enerji-bant aralığının daralmasından, dolayısıyla yarıiletkenin malzeme parametrelerinin enerji-bant aralığı değişiminden etkilenmesinden dolayı kaynaklanır [56]. Güneş hücrelerinde, artan sıcaklıkla açık devre gerilimindeki azalma, kısa devre akım yoğunluğundaki artmaya göre baskın olduğundan; güneş hücrelerinin performansı artan sıcaklıkla azalır [27,28,31].



## 5. TEORİK ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde; güneş hücresi çalışma sıcaklığıyla ilgili literatür bilgisi, teorik çalışmalar ile elde edilen Ge güneş hücre performansı ve buna bağlı olarak, sıcaklığın Ge güneş hücresi performansı üzerindeki etkisinin detaylı incelemesi sunuldu.

### 5.1. Güneş Hücresi Çalışma Sıcaklığı

Güneş enerjisi sınırsız, temiz ve çevre dostu bir enerji sağladığından, en ümit verici yenilenebilir enerji türüdür. Güneş enerjisi uygulamaları içinde; PV kullanımı, en geniş şekilde kullanılan yollardan birisidir ve güneş enerjisinin elektriğe doğrudan dönüşümünü mümkün kılar. PV'ler, hızlıca gelişen teknolojisi ve dünyanın enerji taleplerini karşılamak için dikkate değer potansiyeli ile ön plandadırlar [29,41].

Güneş hücresi, güneş enerjisini doğrudan elektriksel enerjiye dönüştürebilen opto-elektronik bir aygıttır [28]. Sıcaklığın güneş PV hücrelerin performansını etkileyen çok önemli bir faktör olduğu iyi bilinir [29]. Çalışma sıcaklığı, PV dönüşüm sürecinde merkezi bir rol oynar [33].

Standart test koşulları altında güneş hücrelerinin karakterizasyonu, 25 °C'de yapılır. Fakat; çalışma sıcaklıkları, PV kurulumlarında bu değerden önemli derecede sapabilir. Çalışma koşulları, çoğunlukla aydınlatma seviyesine, güneş radyasyon şiddetine, ortam sıcaklığına, yerel rüzgar hızına, PV modülün konumuna ve üretilen ısıyı dağıtma kapasitesine bağlıdır [25,33,34].

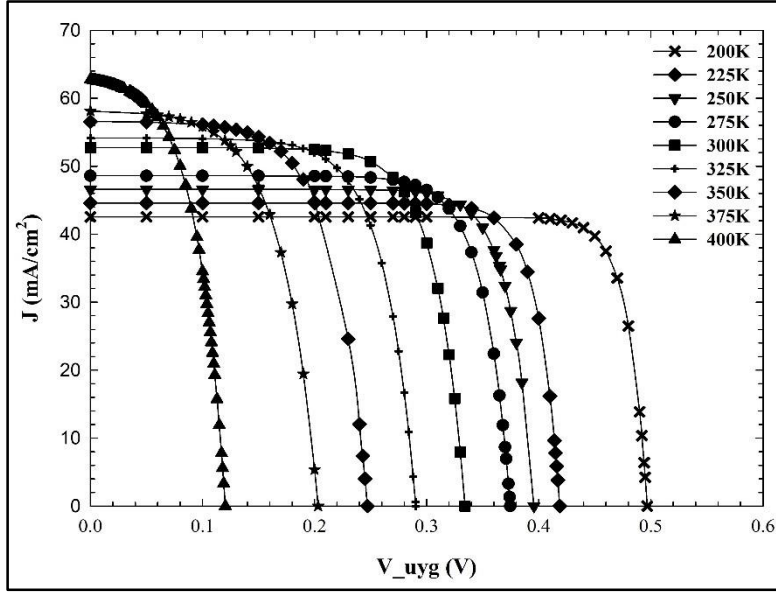
Karasal uygulamalarda; güneş hücreleri, genellikle 15 °C'den 50 °C'ye kadar sıcaklık aralığına ve hatta uzay ve konsantratör sistemlerinde daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarından dolayı; güneş hücrelerinin sıcaklıkla davranışının çalışılması, hücre parametrelerinin sıcaklık üzerindeki bağımlılığının hesaplanması önemlidir [28,30,37]. Bir güneş hücresinin performansı,  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$  parametreleri tarafından belirlenir [28]. Bir güneş hücresinin performans parametreleri  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$  sıcaklık bağımlı olduklarından;

sıcaklık değişimi, bu parametreleri ve dolayısıyla güneş hücresinin performansını etkiler [28,30].

Hücre sıcaklığı değiştiği zaman, optik ve elektriksel parametreler gibi yarıiletken malzemenin özgün karakteristiği buna bağlı olarak değişecektir. Bu değişimler, güneş hücresinin hem optik hem de elektriksel özelliklerini etkiler; bu durum güneş hücresinin performansını değiştirebilir. Bu yüzden; hücre sıcaklığı, güneş hücresinin performansı açısından önemli bir faktördür [29,33,41,77]. Fan [38], Singh ve Ravindra [28], aralarında Ge güneş hücresinde bulunduğu çeşitli güneş hücrelerinin performanslarının sıcaklık bağımlılığı üzerine teorik çalışmalar gerçekleştirmiştir. Fan, tek-eklem Si, Ge ve GaAs güneş hücrelerinin parametrelerinin sıcaklık bağımlılığını hesaplariken; Singh ve Ravindra, Ge, Si, InP, GaAs, CdTe ve CdS yarıiletken malzemelerine dayanan güneş hücrelerinin performans parametrelerinin sıcaklık bağımlılığını araştırmıştır. Her iki çalışmada da; ideal ya da yüksek kaliteli güneş hücreleri dikkate alınmıştır. Yapılan çalışmalarda; Ge güneş hücresi de dahil diğer bütün güneş hücrelerinde, artan sıcaklık ile  $J_{SC}$ 'nin artmasına rağmen,  $V_{OC}$  ve  $FF$  parametrelerinin azalmasından dolayı; güneş hücrelerinin enerji dönüşüm verimleri azalmıştır.

## 5.2. Teorik Sonuçlar ve Tartışma

Yarıiletken bir PV hücresi, bir p-n eklemi vasıtasıyla güneş enerjisini doğrudan elektriksel enerjiye dönüştürür [35]. Fotovoltaik dönüşüm sürecinde; çalışma sıcaklığı, güneş hücrelerinin performansını etkileyen çok önemli bir faktördür [29,33,77]. Hücre sıcaklığı, PV hücrelerin performansı açısından büyük önem arz eder [41]. Sıcaklığın p-n eklem Ge güneş hücresinin performans parametreleri  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$  üzerindeki etkisi, teorik olarak araştırıldı. Teorik çalışmalar için, Bölüm 4'te sunulan analitik güneş hücre modeli kullanıldı. Ge güneş hücresinin  $J$ - $V$  karakteristikleri, Eş.(3.15) ile verilen model kullanılarak tanımlandı.  $AMI,5G$  spektrum,  $I$ -güneş aydınlatması altında,  $200$ - $400$  K sıcaklık aralığında  $25$  K'lik adımlarla Ge güneş hücresinin teorik olarak elde edilen sıcaklık bağımlı  $J$ - $V$  eğrileri, Şekil (5.1)'de verildi.  $200$  K,  $300$  K ve  $400$  K sıcaklıkta performans parametreleri için teorik olarak elde edilen sonuçlar, Çizelge (5.1)'de sunuldu.



Şekil 5.1. Ge güneş hücresinin sıcaklık bağımlı  $J$ - $V$  eğrileri

Çizelge 5.1. 200 K, 300 K, 400 K sıcaklıkta hesaplanmış güneş hücre parametreleri

	200 K	300 K	400 K
$V_{OC}$ (V)	0.497	0.334	0.120
$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	42.549	52.731	62.740
$FF$ (%)	85.285	74.040	52.566
$\eta$ (%)	18.028	13.049	3.970

Ge güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$  parametresinin sıcaklık bağımlılığı, Şekil (5.1)'de görülmektedir. Şekil (5.1)'de görüldüğü üzere; Ge güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğu artan sıcaklık değeri ile artmaktadır. Kısa devre akım yoğunluğu değerleri, çeşitli sıcaklıklarda Eş.(4.1) kullanılarak hesaplandı. Artan sıcaklıkla kısa devre akım yoğunluğundaki değişim, sıcaklık ile bant aralığının değişiminden kaynaklanmaktadır [28]. Optik soğurma, kesim dalgaboyuna bağlıdır [29]. Bir güneş hücresi aydınlatıldığında; yalnızca yarıiletkenin bant aralığı enerjisine eşit ya da daha büyük enerjilere sahip olan fotonlar soğurulur ve soğurulan fotonlar, e-h çiftleri oluşturur [28]. Taşıyıcı üretimi için gerekli enerjili fotonların kesim dalgaboyu, bant aralığına bağlıdır [28,29]. Yarıiletkenlerde bant aralığının sıcaklık bağımlılığı, Varshni tarafından sunulan Eş.(4.28) ile tanımlanabilir [25,28,29]. Eş.(4.28) kullanılarak; Ge yarıiletken malzemesi için her bir sıcaklıkta bant aralığı değerleri hesaplandı. Eş.(4.28)'e göre; sıcaklıktaki artış ile enerji-bant aralığının azalacağı açıktır [25,29]. Bant aralığı değerinin sıcaklıktaki artma ile azaldığı görüldü. Güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğu parametresi, en çok yarıiletken malzemesinin enerji-bant aralığına bağlı olan optik soğurma kenarına bağlıdır. Artan sıcaklık güneş hücresi

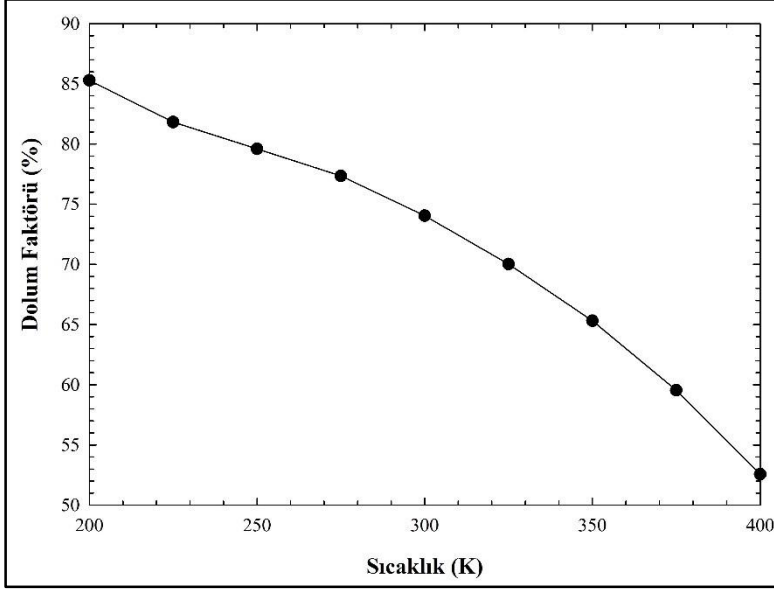
malzemesinin bant aralığını daraltır; bu durum optik soğurma kenarını genişletir [27]. Bant aralığındaki azalma, ışık soğurumunda artmaya sebep olur [30]. Daha az enerjiye sahip fotonların soğurulması ile üretilen e-h çiftleri miktarı artar [25]. Artan sıcaklık ile bant aralığının azalması nedeniyle; güneş spektrumunun daha uzun dalgaboyu bölgelerindeki fotonlar, güneş hücresi tarafından soğurulabilir; bu durum daha fazla foton-sebepli üretilmiş taşıyıcılara sebep olur ve böylelikle kısa devre akım yoğunluğu artar [25,27,28]. Kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$ 'deki bu artış, artan sıcaklık ile bant aralığındaki azalma ile ilişkilendirilebilir [25,27-31,34-37,39,41].

Ge güneş hücresinin açık devre gerilimi  $V_{OC}$  parametresinin sıcaklık bağımlılığı, Şekil (5.1)'de görülmektedir. Şekil (5.1)'de görüldüğü üzere; Ge güneş hücresinin açık devre gerilimi, artan sıcaklık değeri ile azalmaktadır. Her bir sıcaklık için açık devre gerilimi değeri, her bir ilgili sıcaklıkta belirlenmiş kısa devre akım yoğunluğu ve ters doyum akım yoğunluğu değerlerinin, Eş.(4.19)'da kullanılmasıyla belirlendi. Ge güneş hücresinin ters doyum akım yoğunluğu değerleri, Eş. (4.12) kullanılarak hesaplandı. Ters doyum akım yoğunluğu  $J_0$ , güneş hücrelerinin performansını etkileyen kritik bir parametredir [28]. Ters doyum akım yoğunluğu, malzeme bağımlı bir parametredir ve malzemenin bant aralığına bağlıdır [28,43]. Eş.(4.12)'den görülebildiği gibi; ters doyum akım yoğunluğu, aydınlatma parametrelerinin herhangi birine doğrudan bağlı olmayıp, yarıiletken malzemenin taşıyıcı parametrelerine ve özgün taşıyıcı konsantrasyonu  $n_i$  değerine bağlıdır. Özgün taşıyıcı konsantrasyonu, valans ve iletkenlik bantlarındaki etkin durumların yoğunluğuna ve yarıiletken malzemenin bant aralığına bağlıdır [28,43]. Ters doyum akım yoğunluğu, yarıiletken malzemenin özgün taşıyıcı konsantrasyonunun karesiyle orantılıdır [28,32,35,43]. Ters doyum akım yoğunluğunun büyüklüğü, esasen özgün taşıyıcı konsantrasyonunun karesi üzerindeki etkisi yüzünden, yarıiletken malzemenin bant aralığı tarafından belirlenir [35]. Açık devre gerilimi  $V_{OC}$ , kısa devre akım yoğunluğu  $J_{SC}$  ve ters doyum akım yoğunluğu  $J_0$  ve dolayısıyla enerji-bant aralığı  $E_g$  ile ilişkilidir [28]. Yüksek bir  $V_{OC}$  elde edilebilmesi için, kesinlikle düşük bir  $J_0$  gerekmektedir [25,28]. Açık devre gerilimi, dikkate değer bir biçimde ters doyum akım yoğunluğuna bağlıdır ve böylece özgün taşıyıcı konsantrasyonu ile güçlü bir şekilde ilişkilidir [26,28]. Artan sıcaklık ile Ge yarıiletken malzemesinin özgün taşıyıcı konsantrasyonundaki artış, ters doyum akım yoğunluğunda bir artışa sebep olur. Açık devre gerilimindeki bu azalma, artan sıcaklık ile ters doyum akım yoğunluğundaki artmayla, dolayısıyla bant aralığındaki azalmayla ilişkilendirilebilir [25,28,31]. Yapılan hesaplamalar sonucunda; artan sıcaklıkla açık devre

gerilimindeki azalışın, kısa devre akım yoğunluğundaki artışa göre baskın olduğu tespit edildi.

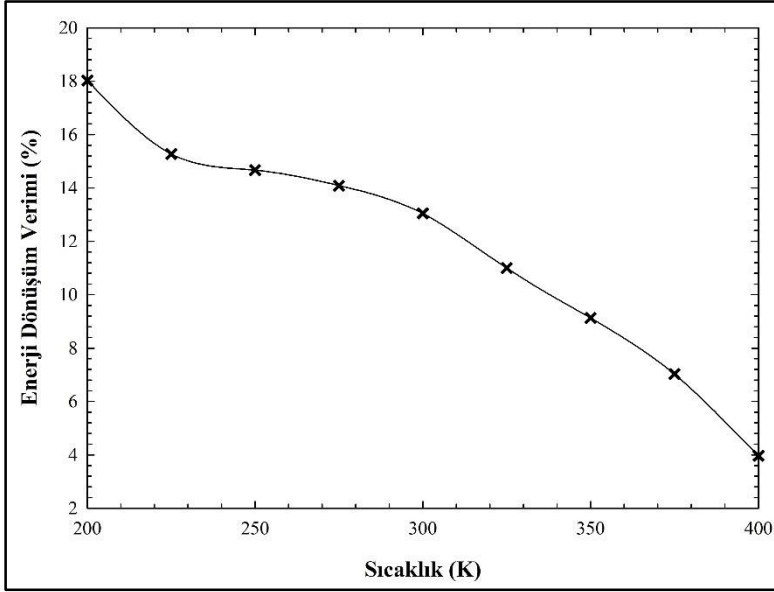
PV'lerde sıklıkla kullanılan yarıiletkenler arasında özgün taşıyıcı konsantrasyonu değerlerinde önemli farklar vardır; bu durum güneş hücrelerinin PV cevabında büyük farklara sebep olabilir [43]. Ge yarıiletken malzemesi için özgün taşıyıcı konsantrasyonu değerleri, Si ya da GaAs gibi başka yarıiletken malzemeler içinkilere kıyasla daha büyüktür [82]. Benzer güneş hücre kaliteleri altında; Ge güneş hücrelerinin Si ya da GaAs güneş hücrelerine nazaran Ge'nin daha küçük bant aralığı değerlerinden kaynaklı daha büyük  $ni^2$  değerleriyle ilişkilendirilebilen daha yüksek ters doyum akım yoğunluğu değerlerine sahip olacağı düşünülür [28]. Benzer güneş hücre kaliteleri altında; Ge güneş hücresinin Si ya da GaAs güneş hücrelerine kıyasla daha küçük açık devre gerilimi değerlerine sahip olacağı düşünülür; bu durum, büyük oranda  $ni^2$  değerlerindeki büyük farktan meydana gelen ters doyum akım yoğunluğu değerlerindeki büyük farka atfedilebilir [38,43].

Ge güneş hücresinin dolum faktörü FF parametresinin sıcaklık bağımlılığı, Şekil (5.2)'de verildi. Şekil (5.2)'den görüldüğü üzere; Ge güneş hücresinin dolum faktörü artan sıcaklık ile azalmaktadır. Her bir sıcaklıkta dolum faktörü değeri, Green tarafından sunulan Eş.(4.22) kullanılarak belirlendi [25,28,39,77]. Güneş hücresinin performansı üzerindeki seri direnç ve şönt direnç etkisinden kaynaklanan dirençsel kayıpların içinde hesaba katılmadığı ve idealite faktörü  $n$ 'nin bir olarak alındığı, dolum faktörünün yalnızca açık devre gerilimine bağlı olarak verildiği Eş.(4.22) ile sunulan bu ifade, yaklaşık olarak ideal FF değerini sağlar [25,28,39,67,77,79]. Her bir sıcaklıkta dolum faktörü parametresinin belirlenmesi işleminde; her bir ilgili sıcaklık değerinde belirlenmiş açık devre gerilimi değeri kullanıldı. Dolum faktöründeki bu azalma, artan sıcaklık ile açık devre gerilimindeki azalma ile ilişkilendirilebilir [27,28].



Şekil 5.2. Ge güneş hücresinin sıcaklık bağımlı dolum faktörü

Ge güneş hücresinin enerji dönüşüm verimi parametresinin sıcaklık ile değişimi, Şekil (5.3)'te verildi. Şekil (5.3)'ten görüldüğü üzere; Ge güneş hücresinin enerji dönüşüm verimi, artan sıcaklık ile azalmaktadır. Her bir sıcaklıkta enerji dönüşüm verimi değeri, Eş.(4.25) kullanılarak belirlendi. Her bir sıcaklıkta enerji dönüşüm verimi parametresinin belirlenmesi işleminde; her bir ilgili sıcaklık değerinde belirlenmiş kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi ve dolum faktörü parametresi değerleri kullanıldı. Artan sıcaklık ile kısa devre akım yoğunluğunun artmasına rağmen; açık devre gerilimindeki azalma ve dolum faktöründeki ilişkili azalma, artan sıcaklık ile enerji dönüşüm veriminde bir azalmaya sebep oldu. Sonuç olarak; çalışma sıcaklığı arttıkça, Ge güneş hücresinin performansı azaldı [28,38].



Şekil 5.3. Ge güneş hücresinin sıcaklık bağımlı enerji dönüşüm verimi

Çalışma sıcaklığındaki artış, güneş hücrelerinin performansının azalmasına sebep olan istenmeyen faktör olduğundan dolayı; PV uygulamaları için sıcaklığı mümkün olduğu kadar düşük tutmak amacıyla uygun soğutma sistemleri kullanmak gerekmektedir. Örneğin; yoğunlaştırıcı PV tekniği için, sıcaklık tarafından sebep olunan hücre performansının azalması, soğutma çalışmaları gibi ilave çabaların yapılması gerektiğine işaret eder [27,28,41,42].

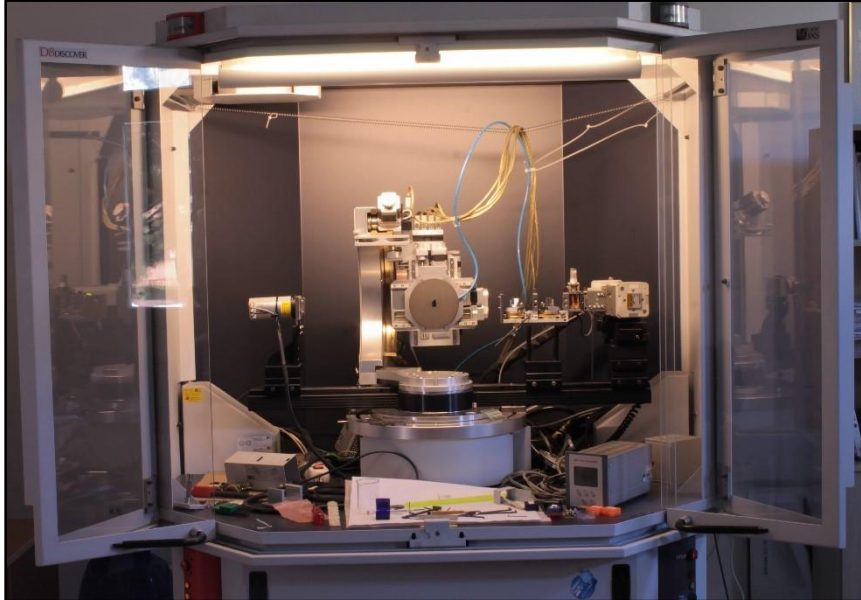


## 6. KARAKTERİZASYON ANALİZ SİSTEMLERİ

Bu bölümde; tez kapsamında kullanılan karakterizasyon analiz sistemleri hakkında bilgiler sunuldu.

### 6.1. X-Işını Kırınım (XRD) Sistemi

Kristal yapıyı oluşturan atomlar, kristal yapı üzerine gönderilen X-ışını demetini bütün yönlerde saçarlar. Bu saçılmalar neticesinde; bazı ışınlar aralarındaki faz farkı nedeniyle birbirlerini ortadan kaldırırlar. Bu durum, yıkıcı girişim olarak ifade edilir. Bazı ışınlar aynı fazdadırlar ve birbirlerini kuvvetlendirerek yapıcı girişime yol açarlar. Meydana getirilen bu yapıcı girişim, kırınım olarak ifade edilir. XRD tekniği, kristal yapı içeren bir malzemenin tanımlanması, yapısal analizinin gerçekleştirilmesi ve karakterize edilmesi için gerçekleştirilen bir ölçüm tekniğidir. XRD analiz tekniği sayesinde; malzemelerin kristal yapısı, kristal düzlemleri arası mesafeleri, miller indisleri, örgü sabitleri, parçacık boyutları, dislokasyon yoğunlukları, mikro-gerilmeleri gibi özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilir [63,83].

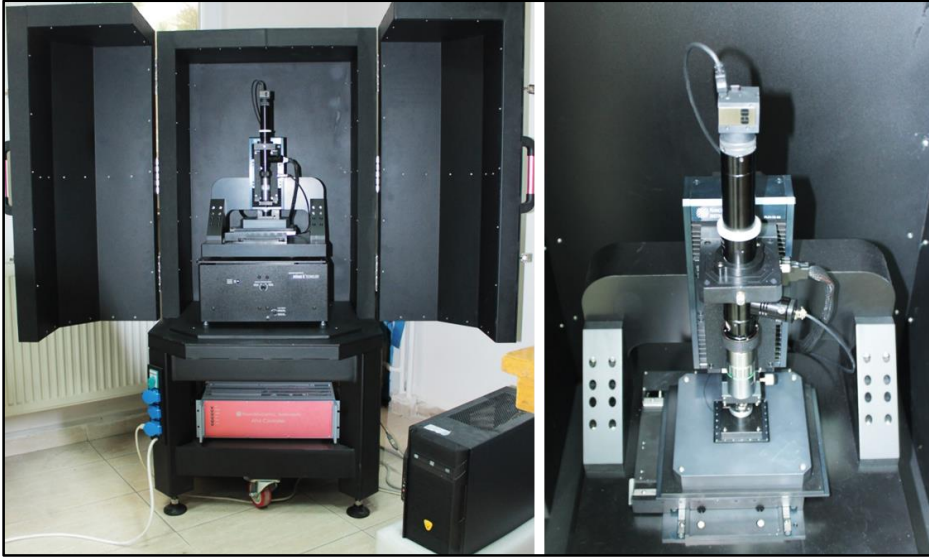


Resim 6.1. Yüksek çözünürlüklü XRD sistemi (Gazi Fotonik)

Bu tez kapsamında; üretilen dilimin X-ışını kırınım ölçümü, Resim (6.1)'de gösterilen, Ge-(022) monokromatöre ve  $\text{CuK}\alpha 1$  ( $1,54 \text{ \AA}$ ) X-ışını kaynağına sahip, yüksek çözünürlüklü Bruker D8 Discover XRD cihazı ile gerçekleştirildi.

## 6.2. Atomik Kuvvet Mikroskopi (AFM) Sistemi

Atomik kuvvet mikroskopi (AFM), atomik incelikte keskin uçlu bir iğne (tip) aracılığıyla, malzemenin yüzey morfolojisini atomik çözünürlükte tayin eden bir tekniktir. AFM, cantilever olarak ifade edilen esnek bir kola bağlı sivri uçlu bir iğnenin incelenecek yüzey üzerinde tarama yapacak şekilde hareket ettirilmesi ve bu kolda meydana gelen sapmaların kaydedilmesi prensibine dayalı olarak çalışan bir yüzey analizi sistemidir. Birçok farklı malzeme yüzeyinin atomik çözünürlükte iki ya da üç boyutlu görüntüleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri, AFM analizi ile belirlenebilir [63,83].



Resim 6.2. AFM sistemi (Gazi Fotonik)

Bu tez çalışmasında; üretilen alttaşlardan bir tanesinin AFM analizi, Resim (6.2)'de verilen, Nanomanyetik Firması tarafından üretilen yüksek performanslı AFM sistemi ile gerçekleştirildi.

### 6.3. Hall Etkisi Sistemi

Galvanometrik ölçümler, düşük elektrik alanlar altında öz direnç ölçümleri ile düşük elektrik ve manyetik alanlar altında Hall ölçümlerini kapsamaktadır. Bu sayede; elektron ya da hol gibi serbest bir taşıyıcının elektrik alan ve manyetik alan altındaki hareketleri üzerine fikir sahibi olunur. Bir Hall etkisi sistemi aracılığıyla; malzemedeki taşıyıcı türü (elektron ya da hol), taşıyıcı yoğunluğu, taşıyıcı mobilitesi ve öz direnç gibi önemli elektriksel özellikler belirlenebilir [84,85].



Resim 6.3. Hall etkisi sistemi (Gazi Fotonik)

Bu tez kapsamında; üretilen alttaşım öz direnç ve Hall etkisi ölçümleri, Van der Pauw yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Öz direnç ve Hall etkisi ölçümleri, Resim (6.3)'te sunulan, yüksek empedans girişli Lakeshore 7700 serisi Hall etkisi ölçüm sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.

### 6.4. İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS) Sistemi

İkincil iyon kütle spektroskopisi (SIMS), yüksek vakum ortamında bir malzeme yüzeyinin ağır parçacıkların birincil iyon demeti ile bombardıman edilerek malzeme yüzeyinden ikincil iyonlar olarak ifade edilen yüklü parçacıkların püskürtülmesi ve püskürtülen ikincil

iyonların hassas bir kütle spektrometresine ulaşarak algılanması esasına dayanır. SIMS sürecinde; malzemenin yüzey atomik dağılım analizinin yanı sıra malzemenin seçilen bir matris alanının *nm* boyutunda aşındırılarak püskürtülmesi ile derinlik boyunca nicel analiz gerçekleştirmekte mümkün olmaktadır. İkincil iyon kütle spektroskopisinde; eğer, malzeme çok sayıda elektropozitif element içeriyorsa birincil iyon kaynağı olarak genellikle oksijen kaynağı ( $O^+$ ) kullanılırken, çok sayıda elektronegatif element içeriyorsa birincil iyon kaynağı olarak genellikle sezyum kaynağı ( $Cs^+$ ) kullanılmaktadır. İkincil iyon kütle spektroskopisi teknolojisinde; madde miktarının konsantrasyon olarak sağlanabilmesi, bir referans numunenin kullanılması ile mümkün olmaktadır [63,83].



Resim 6.4. SIMS sistemi (Gazi Fotonik)

Bu tez çalışması dahilinde; P-difüzyonu derinlik profillerinin belirlenmesi işlemleri, Resim (6.4)'te verilen Hiden SIMS sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.

### 6.5. Akım-Gerilim (*I-V*) Ölçüm Sistemi

Akım-Gerilim (*I-V*) ölçüm sistemi aracılığıyla; bir güneş hücresinin performans parametreleri belirlenebilir. Bu tez çalışması kapsamında; üretilen Ge güneş hücresinin *I-V* ölçümleri, Keithley 4200-SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi ve *AMI,5* spektrumunu sağlayabilen NewPort Oriel Sol3A güneş simülatörü kullanılarak gerçekleştirildi. Simülatör, *AMI,5* spektrumu için *I*-güneş altındaki ışınım yoğunluğu  $1000 W/m^2$  olacak şekilde kalibre edilmiştir. Keithley 4200-SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi, NewPort Oriel Sol3A güneş simülatörü ve ölçüm istasyonundan oluşan *I-V* ölçüm sisteminin görüntüsü, Resim (6.5)'te sunuldu.



Resim 6.5.  $I$ - $V$  ölçüm sistemi (Gazi Fotonik)



## 7. ALTTAŞ ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONLAR

Bu bölümde; Ga katkılı Ge tek-kristal külçenin büyütülmesi, külçenin dilimlenmesi, kesilen dilimin leplenmesi ve parlatılması işlemleri gibi alttaş üretimi sürecinde gerçekleştirilen çalışmalar, yapısal, morfolojik ve elektriksel karakterizasyonların belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ölçümler ve belirlenen karakterizasyonlar sunuldu.

### 7.1. Alttaş Üretimi

Alttaş üretimi için gerçekleştirilen Ga katkılı Ge tek-kristal külçenin büyütülmesi, külçenin dilimlenmesi ve kesilen dilimin leplenmesi ve parlatılması işlemleri üzerine bilgiler aşağıda ifade edildi.

#### 7.1.1. Galyum katkılı Germanyum tek-kristal külçenin büyütülmesi

Ga katkılı Ge tek-kristal külçenin büyütülmesi işlemi için kullanılan Cz hacimli tek-kristal büyütme sistemine ve gerçekleştirilen hacimli tek-kristal büyütülmesi işlemine ait bilgiler aşağıda belirtildi.

##### Cz hacimli tek-kristal büyütme sistemi

Kristal büyütme işlemi, yaklaşık olarak 20 mbar'lık bir asal gaz atmosferinde vakum altında gerçekleştirilir. Bu asal gaz atmosferini ayarlamadan önce; sistem,  $10^{-3}$  mbar'lık bir vakum aralığına kadar tahliye edilmelidir. Sonra; asal gazın sistem içine kontrollü bir girişi gerçekleştirilir. Gerekli asal gaz atmosferi, bir basınç kontrol vanası aracılığıyla vakumlama hızının kontrolü ile ayarlanır. Tahliye işlemi, vakum pompası birimi, vakum vanaları ve vakum ölçüm aygıtlarından oluşan bir vakum pompası sistemi aracılığıyla gerçekleştirilir, sistem kontrolü tarafından kontrol edilir ve izlenir.



Resim 7.1. Cz hacimli tek-kristal büyütme sistemi (Gazi Fotonik)

Asal gaz akışı ile birlikte asal gaz basıncı da kontrol edilebilir. Asal gaz olarak ultra saf Argon kullanma, işlem atmosferinin oksijen, hidrojen ya da başka rahatsız edici kontaminasyonlarsız kalmasını garanti eder. Ayrıca; germanyum mono-oksit (GeO) parçacıkları, asal gaz akışı nedeniyle işlem odasından sürekli olarak uzaklaştırılır ve süpürülüp atılır. Oksijen, hidrojen ve başka olası kontaminasyon ile birlikte asal gazda vakum pompası sistemi tarafından tahliye edilir. Asal gaz, bir gaz dağıtım kutusu tarafından merkezi olarak kontrollü bir şekilde sistem içine alınır.

Hazne duvarları, mafhazalı ve plakalı kilit valfi, kilitli hazne, gözetleme camları, elektrik bağlantıları, pota sütunu gibi belirli unsurların ve sistemlerin su ile soğutulması gerekmektedir. Bireysel unsurlar ve sistemler için soğutma suyu beslemesi, ayrı besleme ve dönüş hatları olan bir soğutma suyu dağıtım sistemi tarafından gerçekleştirilir. Su sıcaklığı ve akış hızı, sıcaklık duyarlı unsurların ve sistemlerin soğutma suyu dönüş hattında kontrol edilir. Ek olarak; taban haznesi ile birlikte üst haznenin, bağlantı flanşı filtre kartuşlarının, fırın haznesi üstü ve altının beslemesinde bir su akış kontrolü gerçekleştirilir. Su basıncı, bir

basınç düşürücü ile ayarlanabilir ve kontrol edilebilir. Sorunsuz bir çalışma için gerekli soğutma suyu miktarının mevcut olduğu ve soğutma suyu giriş sıcaklığının uygun olduğu garantiye alınmalıdır.

Büyütme işleminde tek-kristal eşzamanlı dönüş altında eriyikten çekilir. Çekirdek tutucunun bağlı olduğu kablonun dönüşü için dönel tahrik mekanizması, çekilmesi ve indirilmesi için lift tahrik mekanizması bulunmaktadır.

Kristal büyütme işleminde; pota kristale ters yönde döndürülür ve eriyik yüksekliğine bağlı olarak yükseltilir. Potanın hareketini gerçekleştiren sistem, iki tahrik biriminden oluşur. Bu birimlerden birisi, bir sütun ile potanın dönüşü içindir. Sütun kontrollü bir elektrik motoru tarafından tahrik edilir. Diğer birim ise dönüş esnasında pota taşıyıcısının yükseltilmesi ya da indirilmesi içindir. Bu tahrik birimi, kontrollü bir elektrik motoru tarafından tahrik edilen bir aygıt ile üste ya da alta doğru hareket ettirilir. Pota taşıyıcısının mevcut konumu, bir konum belirleyici tarafından belirlenir ve kontrol birimine iletilir.

Kilitli hazne ve işlem haznesi, kaldırılabilir ve indirilebilir; böylece temizleme, bakım ya da hazırlık çalışmaları yapılabilir. Sistem, bir kaldırma motoru, bilyalı vida ve bir klavuz raydan oluşur. Kilitli hazne, işlem haznesiyle doğrudan bağlantılıdır. Kilitli hazne ve işlem haznesi bir kilit valfi ile birbirinden ayrılabilir.

İşlem haznesi, üst hazne, taban haznesi, fırın haznesi olarak belirtilen hazne bölümlerinden oluşur. Pota ısıtıcısı için elektrik bağlantıları, vakumlama istasyonu için vakum bağlantıları, Ar girişi için gaz bağlantısı ve pota sütunu için besleme kanalı taban haznesindedir. Ge yüklü pota, taban haznesine koyulur. Yükseltilebildiği, indirilebildiği ve döndürülebildiği bir pota sütununa sabitlenir. İşlemin gözlemlenmesi için ilgili gözetleme camları ve kilit valfi için bağlantı flanşları üst haznededir. Gözetleme camlarının bazıları, eriyikten gelen ışık radyasyonunu azaltmak için altın bir filtreye sahiptir. Örneğin; kameranın gözlem penceresi altın filtreli gözetleme camına sahiptir. Kapalı durumda hazne bölümleri birbirine karşı vakum sızdırmazdır. Belirtildiği gibi; tüm işlem haznesi, bir soğutma suyu sistemi aracılığıyla soğutulur. İşlem haznesinde bulunan parçaların görüntüleri, Resim (7.2)'de verildi.



Resim 7.2. İşlem haznesinde bulunan parçaların görüntüleri (Gazi Fotonik)

Kristal büyütme işleminde; bir CCD kamera, eritme, daldırma, boyun, omuz ve gövde işlem aşamalarını gözlemler ve kaydeder. Kamera sinyali, onu ona göre düzenleyen işlem kontrol sistemine iletilir. Kamera, sistemin üst haznesinin yukarısına monte edilmiş bir kamera dayanağında bulunur. Kameranın görüş açısı, kamera pota bölgesini gösterecek şekilde kamera dayanağı aracılığıyla ayarlanır.

Eriyik ve ısıtıcı sıcaklığını ölçme için kilitli haznenin yukarısında ve fırın haznesinin üst kenarında bulunan pirometrelere başvurulur. Ölçülen tüm değerler ve birim parametreleri, pirometre ile bir seri ara yüz üzerinden okunur ve işlem kontrol sistemine iletilir. Ölçülen mevcut sıcaklık değerlerine ve belirtilen sıcaklık ayar noktalarına göre; işlem kontrol sistemi, ısıtıcı sıcaklığını yukarı ya da aşağı ayarlar.

Ga katkılı Ge tek-kristal külçenin büyütülmesi işlemi, Resim (7.1)'de sunulan PVA Tepla CGS-Lab Ge hacimli tek-kristal büyütme sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.

### Tek-kristal külçenin büyütülmesi işlemi

Ge güneş hücresi fabrikasyon işleminde kullanmak için;  $170 \mu m$  kalınlıklı, (100)-yönelimli, yüzey morfolojisi açısından güneş hücresi gibi hassas elektro-optik aygıt üretiminde kullanılabilir kaliteye sahip, düşük öz dirençli ( $0,035 \Omega cm$ ) p-tipi tek-kristal Ge alttaşı üretimi hedeflendi. Bu amaç doğrultusunda; ilk olarak Cz tekniği aracılığıyla, p-tipi Ge tek-kristal külçenin büyütülmesi işlemine odaklanıldı. p-tipi iletkenlik sağlamak amacıyla; katkı malzemesi olarak, periyodik tablonun III. grubundan Ga elementi kullanıldı.  $10 kg$  polikristal Ge külçesi kullanımını altında; hedeflenen p-tipi iletkenlik değerini sağlamak için kullanılması gereken Ga katkı malzeme miktarı, teorik hesaplama ile belirlendi. Büyütme işlemi için  $10 kg$  polikristal Ge külçe ve  $\sim 1 g$  Ga kullanıldı.

Temizlik ve yükleme işlemlerinin ardından; Ar gaz hattının, pirometrelerin, vakum pompası sisteminin, soğutma suyu dağıtım sisteminin, UPS ve jeneratörün kontrol işlemlerinin yapılmasını takiben CGS-Lab Ge hacimli tek kristal büyütme sistemi,  $\sim 10^{-3} mbar$ 'lık bir basınç değerine kadar vakumlandı. Büyütme reçetesi altında; sistem otomatik moda alınarak süreç başlatıldı. Polikristal külçelerin pota içine yüklenmesi işleminde; farklı boyutlu polikristal külçelerin pota içindeki konumsal dağılımı, eritme esnasında külçelerin şiddetli hareketlerinden kaçınılacak şekilde dikkate alındı. Böyle hareketler eriyiğin sıçramasına sebep olabilir; bu durum sıcak bölgenin parçalarına zarar verebilir [44].

Sistem içi basınç,  $\sim 25 mbar$  değerine artıncaya kadar; sistem, Ar ile beslendi.  $\sim 25 mbar$ 'lık iç basınç değerinin sağlanmasıyla birlikte, Ar beslemesi kesildi. Sistem,  $\sim 10^{-1} mbar$ 'lık bir basınç değeri elde edilene kadar vakumlandı ve bu değerin eldesiyle, vakum valfi kapatıldı ve böylece ilk pörç işlemi uygulandı. Bu şekilde olmak üzere; yedi adet pörç işlemi gerçekleştirildi. Sekizinci ve son pörç işleminde; Ar gaz beslemesi altında  $\sim 25 mbar$ 'lık bir iç basınç değerinin yakalanmasıyla beraber, beslemesi kesildi. Vakum valfi açıldı; sistem,  $\sim 3 \times 10^{-3} mbar$  iç basınç değerine kadar vakumlandı ve vakum valfi kapatıldı. Büyütme işleminin devamı için kabul edilebilir en yüksek sızıntı oranı değerinin altında bir sızıntı oranı elde edildi. Vakum test olarak ifade edilen bu aşama, otomatik mod altında gerçekleştirildi.

Vakum test aşamasının ardından; eritme aşamasına geçildi. Bu aşamaya geçilmeyle birlikte, ısıtıcı açıldı. Pota içindeki malzemeler, Ar gazı ortamında Ge'nin erime sıcaklığından daha

yüksek sıcaklık değerlerine ısıtıldılar. Eritme aşamasında; ısıtıcı sıcaklığı  $944\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye, eriyik yüzey sıcaklığı  $1037\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar çıktı. Isıtıcı gücü, eritme aşamasının belirli bir adımında  $16\text{ kW}$  olacak şekilde bu güç değerine kadar kademeli artırıldı. Aşamanın belirli bir adımında ısıtıcı gücü,  $11\text{ kW}$  olacak şekilde bu güç değerine kadar kademeli azaltıldı ve ısıtıcı gücü  $11\text{ kW}$  değerinde sabit tutuldu. Pota içindeki malzemeleri eritme işlem aşaması, otomatik mod altında gerçekleştirildi.

Eriyik yüzey sıcaklığının daldırma işleminin yapılacağı  $937\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta kararlı olmasına kadar geçen süre içinde potanın tahmini daldırma konumuna yükseltilmesi ve çekirdek tek-kristalin ön ısıtımı için eriyik yüzeyine yakına indirilmesi işlemleri, dikkatli bir şekilde uygulandı. Bu süre içinde yapılan tüm işlemler, sırasıyla ve kademeli olarak gerçekleştirildi. Eriyik yüzey sıcaklığı,  $949\text{-}950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yken; çekirdek tek-kristal kullanılan malzeme miktarı altında matematiksel hesaplamaya ve tecrübelerle bağlı olarak belirlenen tahmini daldırma konumunda bulunan potanın içindeki eriyik yüzeyine yakına indirildi. Isıtıcı sıcaklık kontrolü ile eriyik yüzey sıcaklığı  $937\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kararlı olduğunda, çekirdek tek-kristal eriyiğe daldırıldı. Daldırma işleminin gerçekleştirilmesinden kısa bir süre sonra menisküs oluşumu gözlemlendi. Pota ve çekirdek tek-kristalin mevcut konumlarının oluşan menisküs şeklinin iyi bir şekilde izlenebilmesi açısından elverişli olduğu ya da olmadığı, "Average Circle Center Y Actual" kamera parametresi aracılığı ile belirlendi. Mevcut konumlar altında ilgili parametre değerinin, gerekli şart aralığında olduğu görüldü. Bu durum, pota ve çekirdek tek-kristalin mevcut konumlarında, kameranın oluşan menisküs şeklini iyi bir şekilde izliyor olduğunu ifade eder. Daldırma işlem aşaması, manuel mod altında gerçekleştirildi.

Menisküs oluşumu gerçekleştikten sonra; yüksek kristal çekme hızları altında bir boyun büyütmesini içeren sözde "Dash necking" olarak adlandırılan yöntem uygulandı. Boyun büyütme aşaması boyunca sıcaklık uygun bir şekilde ayarlandı. Boyun büyütme işlem aşaması, otomatik mod altında gerçekleştirildi.

Boyun aşamasının bitirilmesinin ardından; kristal çapı, dikkatlice istenilen değere kadar omuz büyütmesi aracılığıyla genişletildi. Sıcaklık, aşama boyunca uygun bir şekilde ayarlandı. Omuz aşamasının başlaması ile kristal çekme hızı azaltıldı. Omuz büyütme aşamasında uzun süre boyunca sabit bir kristal çekme hızı uygulandı. Optik çap kontrol sistemi için gerekli olduğundan; eriyik yüzeyinin seviyesini ayarlamak için pota taşıyıcısının konumu yükseltmeye başlandı. Omuz aşamasının sonuna doğru kristal çekme hızı, bir

miktar artırıldı ve bir süre sonra omuz aşaması tamamlandı. Kristal omuz büyütme işlem aşaması, otomatik mod altında gerçekleştirildi.

Omuz işlem aşamasının gerçekleştirilmesinin ardından; gövde işlem aşamasına geçildi. Gövde kısmı, otomatik çap kontrol sistemi için gerekli olduğundan dolayı; eriyik yüzey seviyesini ayarlamak için pota taşıyıcısını dik doğrultuda yukarıya doğru hareket ettirirken, eriyik yüzey sıcaklığını ve kristal çekme hızını kontrol ederek büyütüldü. Kristal gövde büyütme işlem aşaması, otomatik mod altında gerçekleştirildi.

Silindirik kristal gövde elde edildikten sonra; son koni aşamasına geçildi. CCD kamera ile gözlemlene ve kaydetme işlemleri durduruldu. Son koni aşamasına geçilme ile birlikte pota taşıyıcısının yükseltilmesi işlemi sona erdirildi, kristal çekme hızı azaltıldı. Aşama boyunca; ısıtıcı sıcaklığı ve kristal çekme hızı uygun bir şekilde artırıldı. Kristalin son aşaması, nokta temas çaplı bir kristal ucu elde edilene kadar kontrollü bir şekilde inceltilerek büyütüldü ve sonra kristal eriyikten ayrıldı. Son koni büyütme işlem aşaması, otomatik mod altında gerçekleştirildi.

Kristalin eriyikten ayrılmasının ardından; durdurma aşamasına geçildi. Durdurma aşamasında; kristal yukarıya doğru çekildi. Isıtıcı gücü, durdurma aşamasının belirli bir adımında  $0\text{ kW}$  olacak şekilde bu güç değerine kadar kademeli olarak azaltılarak ısıtıcı kapatıldı. Durdurma işlem aşaması, otomatik mod altında gerçekleştirildi. Isıtıcının kapatılmasından yaklaşık olarak 20 saat sonra; vakum altında olan Cz sistemi, Ar gazı ile vent edildi ve büyütülen Ga katkılı Ge tek-kristal külçesi, sistemden çıkartıldı.

### **7.1.2. Tek-kristal külçenin dilimlenmesi**

Ga katkılı Ge tek-kristal külçenin dilimlenmesi işlemi için kullanılan elmas tel testere sistemine ve gerçekleştirilen çalışmalara ait bilgiler aşağıda verildi.

### Elmas tel testere sistemi

Elmas tel testere sistemi, elektronik bölümü ve tel tahrik bölümü olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Elektronik bölümü, bütün testere tahrik sistem, pnömatik sistem ve soğutma sistem fonksiyonlarını kontrol eder.

Tel tahrik sistemi, iki servo tahrik motoru, iki sarıcı tertibatı, iki gergi kasnak tertibatı ve iki kılavuz kasnak tertibatı bileşenlerinden oluşmaktadır. Tüm bileşenler, boyunduruk plakasında montelidir.

Boyunduruk plakası, tel tahrik sisteminin temelini oluşturur. Boyunduruk plakası, iki hassas ray üzerinde yukarı ve aşağı hareket eden dört hassas yatak bloğuna montelidir. Boyunduruk plakası, 5:1 dişli kutusuna bağlı bir adım motoru ile tahrik edilir. Sert bir kaplin, dişli kutusunu kılavuz vidaya bağlar.

İşlem süresince; her bir servo motor, sarıcı adım motorları ile içeri ve dışarı hareket ettirilir. Sarıcılar, kendilerinin ilgili servo motorunun hızı ve yönüne dayalı çalışırlar. Bu durum, telin her bir tel makarasının üzerine ve dışına doğru bir şekilde sarılmasını garanti eder, telin üst üste geçmesini engeller.

Sarıcı tertibatın altında yerleştirilmiş iki gergi kasnağı vardır. Bu kasnaklar, tel üzerinde uygun gerilimi sürdürmeye yardım ederler. İki kasnak, hassas raylara monte edilmiş ve hava silindirlere bağlanmıştır. Cihazın ön panelindeki göstergeler, hava basıncını gösterir ve her bir göstergenin bitişiğinde monte edilmiş küçük regülatörler ile bağımsız bir şekilde kontrol edilir. İlgili gericilerine giden havanın miktarını kontrol eden iki gergi regülatörü ve onların ilgili göstergeleri, ön panelin üst merkezine yerleştirilmiştir.



Resim 7.3. Elmas tel testere sistemi (Gazi Fotonik)

Gergi kasnakların altı, tel kılavuz kasnaklarıdır. Tel kılavuz kasnakları, salınım mekanizmasına montelidir ve ayarlanabilir değildirler. Testerenin salınım tertibatı, salınım plakası, salınım kaydırma yatakları, salınım motor tertibatı ve salınım kılavuz yataklarından oluşmaktadır. Salınım, boyunduruk plakasına bağlıdır.

Kesme tablaları ya dilimleme ya da parçalama tablalarıdır. Standart dilimleme tablası, iki hassas ray boyunca hareket eden dört hassas yatak bloğunda montelidir ve bir kılavuz vida ve adım motoru ile tahrik edilir. Opsiyonel parçalama tablası, aynı kılavuz vidayı ve adım motorunu kullanır, ama aynı zamanda adım motoruyla çalışan bir döner tabla içerir.

Ga katkılı Ge tek-kristal külçesi, Resim (7.3)'te gösterilen MBT Sistemleri LTD. RTS serisi elmas tel testere sistemi aracılığıyla dilimlendi.

#### Tek-kristal külçenin dilimlenmesi işlemi

İşlem esnasında kullanılan kesim hızı, dilimin eğriliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkiye sahip olan bir parametredir. Farklı kesim hızları altında kesilen iki dilimden, diğerine göre daha yavaş kesim hızı ile kesilmiş olan dilim, daha az eğriliğe ve daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olacaktır. Dolayısıyla; daha yüksek kesim hızı kullanılarak gerçekleştirilen işleme nazaran daha kaliteli bir kesim yapılmış ve lepleme ve parlatma işlemlerine daha uygun bir dilim kesilmiş olacaktır. Bu yüzden; dilimleme işlemi, oldukça

yavaş bir kesim hızı altında gerçekleştirildi. Dilim, tek-kristal külçenin gövde kısmından kesildi.

### **7.1.3. Dilimin leplemesi ve parlatılması**

Kesilen dilimin leplemesi ve parlatılması işlemleri için kullanılan lepleme ve parlatma sistemine ve gerçekleştirilen lepleme ve parlatma işlemlerine ait bilgiler aşağıda sunuldu.

#### Lepleme ve parlatma sistemi

Logitech PM5 auto-lap/pol lepleme ve parlatma sistemi, lepleme ve parlatma işlemlerini yapabilecek iki farklı, otomatik kontrol edilebilir moda sahiptir. Bu iki moddan birisi, otomatik lepleme işlemi için; diğeri ise, otomatik parlatma işlemi içindir. PM5 auto-lap/pol sistemleri çalışmasının iki modu birbirinden farklı olduğu için; bu sistemleri idare eden yazılım versiyonları farklıdır. Hangi işlem gerçekleştirilecekse o mod seçilir.

Bu sistem kullanılarak; maksimum 4'' çapa kadar numuneler leplenebilir ve parlatılabilir. İşlenecek numuneler, cam altlıklara kuartz vaks aracılığıyla yapıştırılır. Yapıştırma işlemi, numune ile cam altlık arasında herhangi bir hava kabarcığı oluşmayacak şekilde gerçekleştirilmelidir. Numunenin yapıştırıldığı cam altlık, numune tutucu olarak ifade edilen PP6 jig aparatına vakum ile tutturulur. Birisi, üzerinde numune yapıştırılmış cam altlığın tutturulmuş olduğu jige ve diğeri ise yüzey düzgünlüğünü kontrol etmek için kullanılan aparata kılavuzluk eden iki adet silindirik kol tertibatı yer almaktadır. Parlatma işlemi için parlatma pedi yapıştırılmış paslanmaz çelik tabla ve lepleme işlemi için ise demir döküm tabla kullanılmaktadır. Parlatma pedinin paslanmaz çelik tablaya düzgün bir şekilde hizalanması ve yapıştırılması da çok önemlidir. Yapıştırma işleminde hava kabarcıklarının oluşturulmadığından emin olunmalıdır.



Resim 7.4. Lepleme ve parlatma sistemi (Gazi Fotonik)

Lepleme işlemi, blok halindeki ‘bulk’ adı verilen hacimli kristalden kesilmiş olan ve elmas kesim telinin kesim hatalarını içeren dilimin hem eğriliğinin hem de yüzey pürüzlülüğünün azaltılması işlemidir ve dilimin parlatma işlemine hazırlanması açısından kritik öneme sahiptir. Lepleme işleminde; otomatik lepleme tablasının eğimi ve lepleme miktarı önemli bir rol oynamaktadır. Eğim, operatör tarafından ayarlanan/set edilen değerden sapmaların, tablanın konumunun sürekli olarak sistem tarafından denetlenmesiyle kontrol edilir. Başka bir ifadeyle; otomatik lepleme tablası düzgünlük kontrolü, tabla konumunun sürekli olarak ölçülmesi ve operatör tarafından set edilen değerden herhangi bir sapmanın otomatik olarak düzeltilmesi ile sağlanır. Lepleme miktarı ise, lepleme işlemine başlamadan önce yapılan kalınlık kalibrasyonu ve lepleme durumunun anlık ölçüldüğü elektronik ölçüm aletinin kullanılması ile belirlenir. Anlık azalan kalınlık, referans noktasına göre lepleme miktarını verecek ve lepleme azalan kalınlığın set edilen değere gelmesiyle tamamlanacaktır.

Parlatma işlemi, esas olarak yüzeyin, üzerinde gerçekleştirilecek elektro-optik aygıt fabrikasyonuna uygunluğunun elde edilebilmesi açısından kritik öneme sahip olan bir adımdır. Lepleme tablasının eğim kontrolüne benzer şekilde, parlatma tablasının kontrol edilmesi de önem arz etmektedir. Bu kontrol, tablanın sapmasının takip edilmesi/ölçülmesi ile mümkündür. Tablanın mevcut/reel konumu ölçülür ve bu ölçüm bir referans noktasını teşkil eder. Bu referans noktası, kontrol sistemi tarafından operatörün set ettiği ilk değer ile değiştirilir. Bu kontrol döngüsü, gerekli olan ilk set değerini yakalamaya çalışarak devam

edecektir. Ayrıca kontrol sistemi, parlatma işlemi sırasında yüzey homojenliğini korumak amacıyla, dış merkezli süpürme sisteminin hassas bir şekilde kontrol edilmesine izin verir.

Kesilen dilimin arka yüzeyinin leplemesi ve ön yüzeyinin leplemesi ve parlatılması işlemleri, Resim (7.4)'te verilen Logitech PM5 auto-lap/pol lepleme ve parlatma sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.

#### Dilim leplemesi ve parlatılması işlemleri

Lepleme ve parlatma işlemleri için, dilimin cam altlıklara herhangi bir hava kabarcığı oluşturulmadan kuartz vaks aracılığıyla yapıştırılması işlemleri, Resim (7.5)'te gösterilen Logitech 1WBS1 tipi, dilim alttaşı bağlama ünitesi kullanılarak gerçekleştirildi.

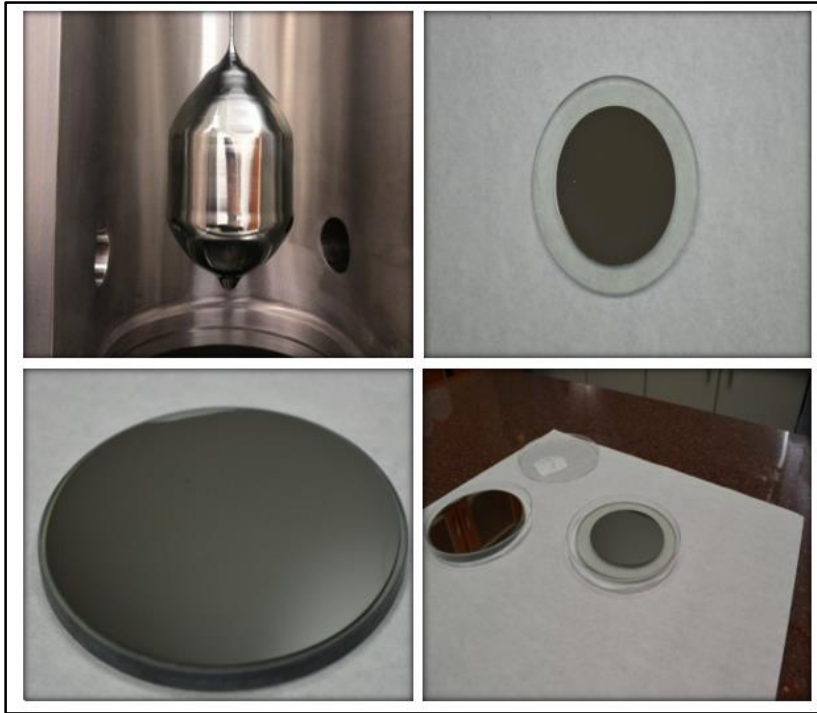
Lepleme işlemleri, demir döküm tabla ve sırasıyla  $9 \mu m$ ,  $3 \mu m$  ve  $1 \mu m$  çaplarına sahip alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) toz parçacıklı hazırlanan solüsyonlar kullanılarak üç ayrı adım uygulaması ile gerçekleştirildi. Lepleme adımları ile önce arka taraf sonra ön taraf olmak üzere her iki yüzeyinde sırasıyla  $9 \mu m$ ,  $3 \mu m$  ve  $1 \mu m$  çaplarına sahip  $Al_2O_3$  toz parçacıklı hazırlanan solüsyonlar kullanılarak işlenmesinin ardından, ıslak kimyasal aşındırma işlemi gerçekleştirildi.

Parlatma işlemleri, parlatma pedleri yapıştırılmış paslanmaz çelik tablalar ve sırasıyla  $1 \mu m$  çapına sahip  $Al_2O_3$  toz parçacıklı hazırlanan solüsyon ve  $30 nm$  parçacık boyutlu alkali kolloidal silika SF1 parlatma sıvısı kullanılarak gerçekleştirildi. Ön yüzeyin parlatılması işlemleri gerçekleştirildikten sonra; temizleme ve kurulama işlemleri yapıldı. Uygulanan işlemler sonucunda; işlenmiş yüzeylere sahip olan hedeflenene uygun kalınlıklı bir dilim elde edildi.



Resim 7.5. Dilim alttaş bağlama ünitesi (Gazi Fotonik)

Elde edilen dilim, X-ışını kırınım ölçümünün ardından; Gazi Fotonik'te bulunan kesme cihazı aracılığıyla kare şekilli parçalara bölündü ve her bir parçanın temizlik işlemi gerçekleştirildi. Temizlik işlemlerinin ardından kurutulan kare şekilli alttaşlar, vakumlu desikatör içinde muhafaza edildi.



Resim 7.6. Elde edilen ürünlerden bazılarının görüntüleri

Alttaş üretim çalışmalarında; farklı özelliklerde büyütülen Ge tek-kristal külçelerden kesilen dilimler de işlenmiştir. Elde edilen ürünlerden bazılarının görüntüleri, Resim (7.6)'da sunuldu.

## 7.2. Karakterizasyonlar

Yapısal, morfolojik ve elektriksel karakterizasyonları belirlemek amacıyla gerçekleştirilen ölçümler ve ölçümlere ait sonuçlar aşağıda ifade edildi.

### 7.2.1. XRD analiz sonuçları

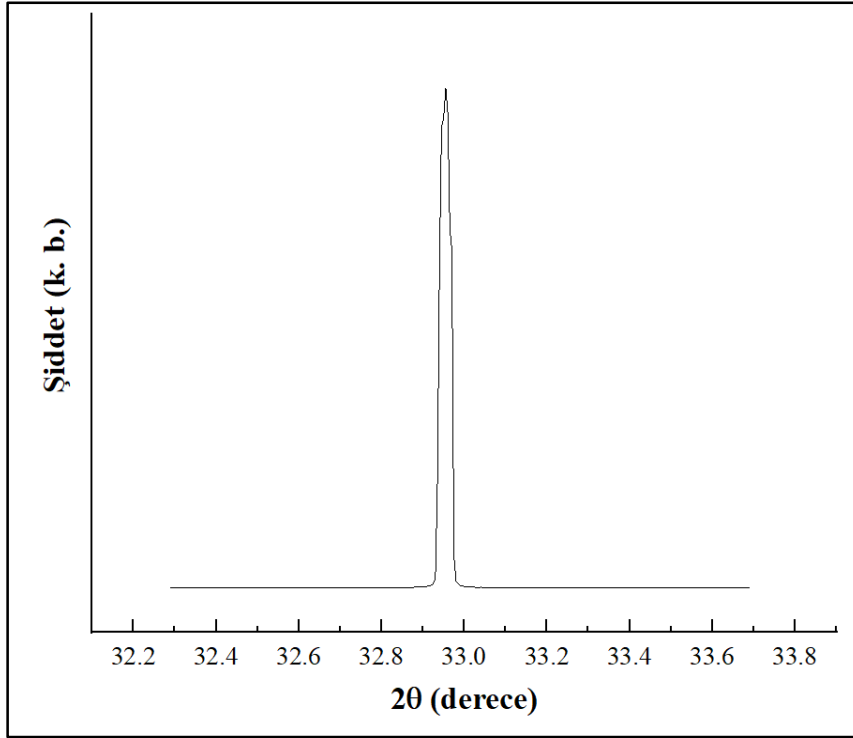
Elde edilen dilimin yapısal karakterizasyonunu belirlemek için, X-ışını kırınım analizi gerçekleştirildi. Dilimin X-ışını kırınım deseni, Şekil (7.1)'de verildi. Tek bir pikin görüldüğü X-ışını kırınım deseninde; elde edilen dilimin, germanyum için *JCPDS card No. 00-004-0545* referansında sunulan (400)-yönelimine karşılık gelen  $2\theta=66,017^\circ$  açılı değerine çok yakın olan  $65,91^\circ$ 'de şiddetli ve keskin bir pik sergilediği görüldü. Bu sonuç, Ge dilimin hedeflenen yönelim ile tek-kristalize olduğunu göstermektedir. Pik yarı genişliği (full width at high maximum-FWHM) değerinin,  $0,033^\circ$  olduğu tespit edildi. Dilimin X-ışını kırınım analizi sonucunda; elde edilen  $\theta$  (Bragg açısı)  $=32,955^\circ$  ve  $FWHM=0,033^\circ$  değerleri kullanılarak belirlenen kristale ait düzlemlerarası mesafe, örgü sabiti, parçacık boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikro-gerilme değerleri, Çizelge (7.1)'de verildi.

Çizelge 7.1. Dilimin yapısal karakterizasyon sonuçları

Düzlemlerarası Mesafe ( $\text{Å}$ )	Örgü Sabiti ( $\text{Å}$ )	Parçacık Boyutu (nm)	Dislokasyon Yoğunluğu ( $\text{cm}^{-2}$ )	Mikro-gerilme
1,416	5,664	286,898	$1,215 \times 10^9$	$9,871 \times 10^{-5}$

Belirlenen düzlemlerarası mesafe değerinin, *JCPDS card No. 00-004-0545* referansında sunulan Ge-(400) yönelimine karşılık gelen düzlemlerarası mesafe değeri  $1,414 \text{ Å}$ 'a çok yakın olduğu görüldü. Belirlenen örgü sabiti değerinin, bahsedilen referansta sunulan Ge kristali örgü sabiti değeri  $5,6576 \text{ Å}$ 'a çok yakın olduğu görüldü. Bragg açısı, düzlemlerarası mesafe ve örgü sabiti değerlerindeki küçük farklar, kullanılan Ga katkısıyla ilişkili olabilir. XRD analizi yapılan bir numuneye ait XRD pikinin yarı genişliği, numunenin parçacık boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikro-gerilmesi ile ilişkilidir [63,83]. Çizelge (7.1)'de

görüldüğü üzere; yapılan hesaplamalar sonucunda dilimin, büyük parçacık boyutu, düşük dislokasyon yoğunluğu ve düşük mikro-gerilme değerlerine sahip olduğu tespit edildi. Dilimin yüksek kristal kalitesine sahip olduğuna işaret eden düşük  $FWHM$  ( $0,033^\circ$ ) değeri, kristaldeki büyük parçacık boyutu, düşük dislokasyon yoğunluğu ve düşük mikro-gerilme ile ilişkilendirilebilir.

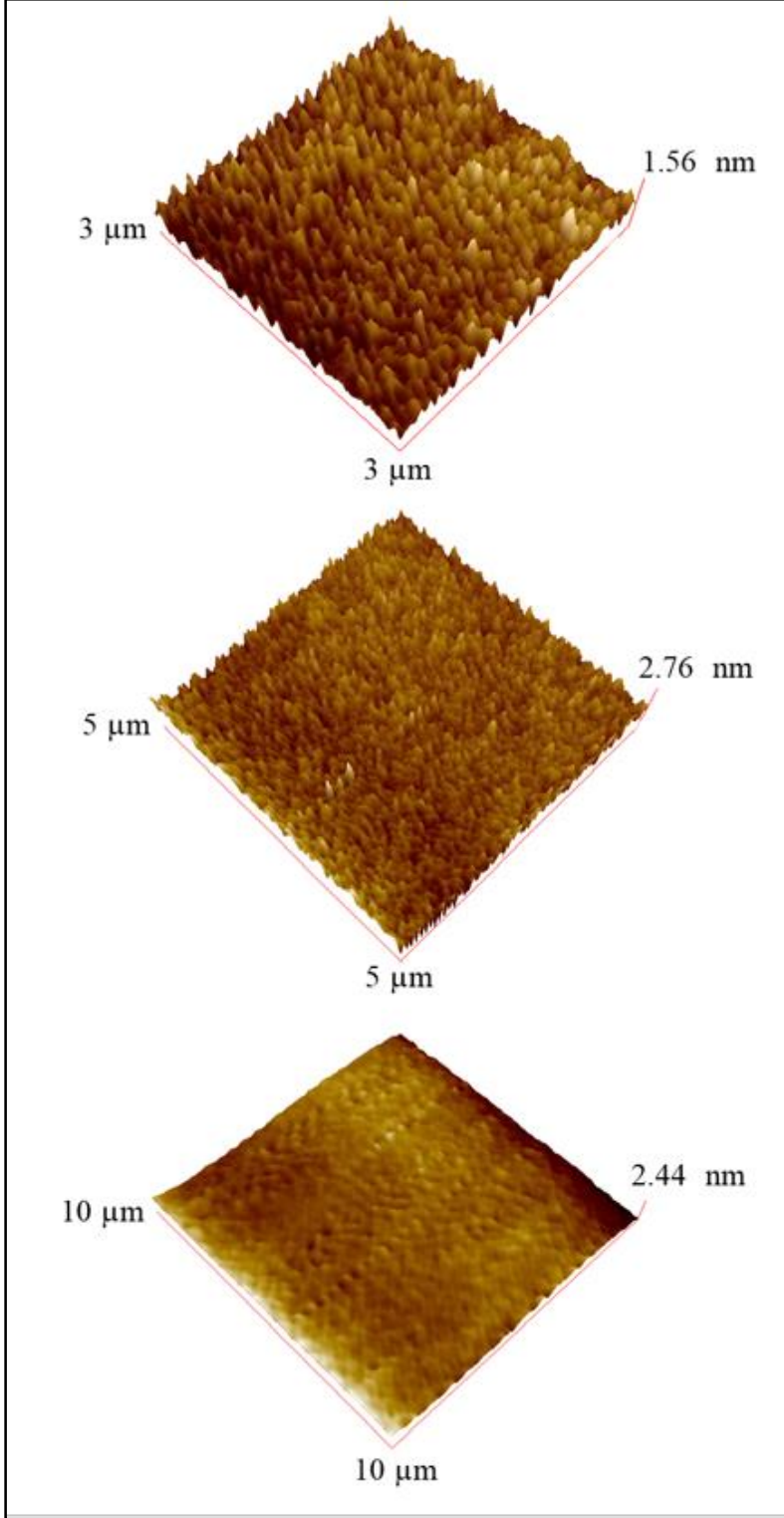


Şekil 7.1. Elde edilen dilimin X-ışını kırınım deseni

### 7.2.2. AFM analiz sonuçları

Üretilen kare şekilli altaşlardan bir tanesinin yüzey morfolojisi, AFM sistemi aracılığıyla araştırıldı. Altaşın parlatılmış yüzeyinin  $3 \times 3 \mu m^2$ ,  $5 \times 5 \mu m^2$  ve  $10 \times 10 \mu m^2$ 'lik yüzey alanlarında taranan 3-boyutlu (3D) atomik kuvvet mikroskopi görüntüleri, Şekil (7.2)'de verildi. Bir numunenin yüzey pürüzlülüğü kalitesi hakkında bilgi veren yüzey pürüzlülüğünün ortalama karekök (root mean square-RMS) değeri, her bir yüzey alanında taranan ilgili atomik kuvvet mikroskopi görüntüsünden hesaplandı. Taraması gerçekleştirilen her bir yüzey alanı için elde edilen RMS değerleri, Çizelge (7.2)'de sunuldu. Altaşın  $3 \times 3 \mu m^2$ ,  $5 \times 5 \mu m^2$  ve  $10 \times 10 \mu m^2$ 'lik yüzey alanlarında taranan 3D AFM görüntüleri ve RMS değerleri, yüzeyin homojenlik ve düzgünlük açısından çok iyi bir kaliteye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen sonuçlardan; Ga katkılamasının homojen olduğu

sonucuna varılabilir. Gerçekleştirilen AFM ölçümleri sonucunda; üretilen alttaşın, yüzey morfolojisi açısından güneş hücresi gibi hassas elektro-optik aygıt üretiminde kullanılabilir kaliteye sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 7.2. Alttaşın 3x3 μm<sup>2</sup>, 5x5 μm<sup>2</sup> ve 10x10 μm<sup>2</sup>'lik yüzey alanlarında taranan 3D AFM görüntüleri

Çizelge 7.2. Her bir yüzey alanı için elde edilen RMS değerleri

<i>Tarama Alanı (<math>\mu\text{m}^2</math>)</i>	<i>RMS (nm)</i>
3x3	0,23
5x5	0,29
10x10	0,47

### 7.2.3. Özdirenç ve Hall etkisi analiz sonuçları

Üretilen kare şekilli alttaşın elektriksel özellikleri, Hall etkisi sistemi aracılığıyla araştırıldı. Bu amaçla; üretilen alttaşta özdirenç ve Hall etkisi ölçümleri, Van der Pauw yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Ölçümler, yaklaşık olarak 300 K sıcaklıkta yapıldı. Hall etkisi ölçümü 0,4 Tesla (T)'lik sabit manyetik alan altında gerçekleştirildi.

Çizelge 7.3. Alttaşın elektriksel karakterizasyon sonuçları

<i>Özdirenç (<math>\Omega\text{cm}</math>)</i>	<i>Hall Katsayısı (<math>\text{cm}^3/\text{C}</math>)</i>	<i>Hall Taşıyıcı Yoğunluğu (<math>\text{cm}^{-3}</math>)</i>	<i>Hall Taşıyıcı Mobilitesi (<math>\text{cm}^2/\text{Vs}</math>)</i>
0,028	20,776	$3 \times 10^{17}$	733,44

Bu çalışmada; 0,035  $\Omega\text{cm}$ 'lik düşük bir özdirence sahip p-tipi tek-kristal Ge alttaş üretimi hedeflendi. 0,035  $\Omega\text{cm}$  p-tipi özdirenç değeri,  $\sim 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'lük bir Hall taşıyıcı konsantrasyonu değerine karşılık gelmektedir [9,82]. 0,4 T sabit manyetik alan altında, yaklaşık olarak 300 K sıcaklıkta gerçekleştirilen Hall etkisi ölçümü sonucunda; alttaşın Hall katsayısının pozitif davranış sergilediği tespit edildi. Bu durum, ölçümü gerçekleştirilen alttaşta çoğunluk serbest taşıyıcının hol olduğunu yani alttaşın p-tipi özellik gösterdiğini ifade eder. Gerçekleştirilen özdirenç ve Hall etkisi ölçümleri aracılığıyla; üretilmiş alttaş için belirlenen özdirenç, Hall katsayısı, Hall taşıyıcı yoğunluğu ve Hall taşıyıcı mobilitesi değerleri, Çizelge (7.3)'te verildi. Hall etkisi sistemi aracılığıyla belirlenen elektriksel karakterizasyonlar sonucunda; üretilmiş alttaşın, hedeflenene uygun p-tipi Ge alttaş olduğu tespit edildi.



## 8. GERMANYUM (Ge) GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ: ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde; Ge güneş hücresi üzerine literatür bilgisi, elde edilen Ge güneş hücresinin üretim süreci, SIMS ve *I-V* ölçümleriyle belirlenen P-difüzyonu derinlik profilleri ve Ge güneş hücresi aygıt karakterizasyon sonuçları, üretilen Ge güneş hücresi performans parametre değerlerinin literatürde bildirilen deneysel sonuçlarla ve bu çalışmada elde edilen teorik sonuçlarla kıyaslamaları sunuldu.

### 8.1. Germanyum (Ge) Güneş Hücresi

Ge malzemesi, nispeten düşük bant aralığından dolayı; güneş hücrelerinde ve TPV hücrelerde uygulama için ilgi çekici yarıiletken bir malzemedir [5,60]. Ge, tandem güneş hücrelerinin fabrikasyonu için ya bir alttaş malzemesi olarak ya da bir fotoaktif taban hücresi olarak temel bir malzemedir [86].

Khvostikov ve arkadaşları, yoğunlaştırılmış güneş ışığının dönüşümü için Ge'ye dayanan PV hücreleri tasarlamıştır [86]. 2007 yılında yayınladıkları çalışmada; MOCVD tekniği ile büyütülen geniş-aralık GaAs bir pencereye ve gaz fazından çinko difüzyonu ile oluşturulan bir p-n ekleme sahip Ge-temelli PV hücrelerin üretildiğini bildirmişlerdir. GaAs penceresiz Ge-temelli PV hücrelerin, *AMI,5D* spektrum, *150*-güneşlik bir konsantrasyon aydınlatması altında, %8,6'ya kadar verime sahip olduğu, GaAs pencereci Ge-temelli PV hücrelerin veriminin, *AMI,5D* spektrum, *150*-güneşlik bir konsantrasyon aydınlatması altında, %10,9 olduğu belirtilmiştir [86]. İnce bir GaAs pancere tabakası, Ge yüzeyinin pasivasyonu için kullanılmıştır. Fabrikasyon işlemlerinde; ZnS/MgF<sub>2</sub> yansıtma-önleyici kaplama kullanılmıştır [86].

Ge, monolitik olarak istifli yüksek verimli çok eklemler güneş hücrelerinde, bir alttaş ya da taban hücre olarak sıkça kullanılır [5]. Burada; Ge p-n eklemi, *III-V* temelli üst eklemlerinde elde edildiği çok eklemler güneş hücre yapısını büyütme işleminde, As ya da P'nin p-tipi Ge alttaş içine difüzyonu ile gerçekleştirilir [5]. Dilim temelli Ge güneş hücreleri, mekanik olarak istifli çok eklemler güneş hücrelerinde taban hücreleri olarak kullanılırlar [5,18,24]. Bu taban hücreleri, üst hücreler ile kalıcı bağlamadan önce ayrı bir şekilde üretilir, işlenirler

[18,24]. Posthuma ve arkadaşları, Ge güneş hücreleri üzerine araştırmalar gerçekleştirmişlerdir [5,9,16,17,87]. 2007 yılında; Posthuma ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [5], uygun bir aygıt gerçekleştirmek için, daha fazla bir temel araştırmanın Ge katkılama, yüzey pasivasyonu ve kontak oluşumu üzerine yapıldığı bildirilmiştir. Yayıcı oluşumu, bir spin-on katkı kaynağından P-difüzyonuyla, ön kontak oluşumu ise kontaklama metalinin a-Si pasivasyon tabakası içinden difüz ettirildiği yenilikçi bir yöntem ile yapılmıştır [5]. Geliştirilmiş süreci kullanarak, o dönemin %7,8 dünya sınıfı bir *AMI,5G* enerji dönüşüm verimine sahip bir Ge güneş hücresinin üretildiği bu çalışmada kaydedilmiştir. Fabrikasyon işleminde; *P507*-Filmtronics SOD kaynağı kullanarak, bir Ga katkılı Cz-Ge alttaşıta  $n^+$  yayıcı difüzyonunun ardından; bir HF solüsyonu kullanarak yüzeyde kalan oksit tabakası kaldırılmıştır. Arka kontak ve arka yüzey alanı, bir Al tabakasının buharlaştırılması ve sonrasında yüksek derecede katkılı bir  $p^+$  bölgesi üretmek için ötektik sıcaklık üzerinde tavlama işlemi ile gerçekleştirilmiştir. Sonrasında; litografik işlem ve kimyasal ıslak aşındırma işleminden oluşan mesa aşındırma işlemi uygulanmıştır. Kimyasal ıslak aşındırma işlemi, bir  $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$  solüsyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüksek hücre verimleri elde etme için çok önemli olan ön yüzey pasivasyonu için, ince bir a-Si tabakası plazma-destekli kimyasal buhar birikimi (plasma-enhanced chemical vapour deposition-PECVD) uygulaması ile kaplanmıştır. Ön kontak oluşumunun yenilikçi bir yöntem ile gerçekleştirildiğinin bildirildiği bu çalışmada; ön kontak gerçekleştirmek için bildirilen bu en yeni yöntem, kontaklama metalinin a-Si pasivasyon tabakası içinden difüzyonuna dayanır. Uygun bir şekilde kalın bir Ag tabakası ile ince bir Pd tabakasını birleştirme, iyi ve yeniden üretilebilir güneş hücresi dolun faktörlerine sebep olmuştur. Kontak yapmak için, ince bir Pd tabakasının kullanıldığı durumda; uygunca düşük bir kontak direnci elde etmek için yeterli bir şekilde kalın bir Ag tabakası ile Pd'nin birleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada; ZnS ve  $\text{MgF}_2$ 'den oluşan ikili tabaka bir yansım-önleyici kaplama kullanılmıştır [5]. J van ve arkadaşları, 2009 yılında, %7,9 *AMI,5G*, 1-güneş dünya rekoru enerji dönüşüm verimine sahip bir Ge PV hücresi bildirmiştir [88]. Yenilikçi bir yöntem olarak bildirilen a-Si ön yüzey pasivasyonu ve ilgili kontaklama teknolojileri gibi Ge güneş hücreleri üzerinde sağlanan gelişim, Ge PV hücreleri için dünya rekoru performanslara sebep olmuştur. Yüksekçe verimli bir Ge güneş hücresi elde etmek için sıg bir yayıcının yapılması gerekmektedir. Mevcut Ge güneş hücresi fabrikasyon işlemi teknolojisini uyarlayarak, Ge hücresi mekanik olarak istifli çok eklemlili güneş hücrelerinde taban eklemi olarak en iyi şekilde kullanılabilir. Ge taban eklemi güneş spektrumunun yalnızca kızıl ötesi bölgesinin bir kısmına karşılık gelen  $\sim 860 \text{ nm}$ 'den  $\sim 1800 \text{ nm}$ 'ye kadar dalgaboylu fotonları

dönüştüreceğinden dolayı; daha derin bir yayıcı ve lazer-sebepli ısıtılmış Al arka kontaklar (daha iyi bir ışık hapsedilmesi için), bir taban eklemi olarak Ge'nin uygulaması için daha uygundur. Bu yüzden; Ge güneş hücreleri üzerindeki çalışmalar, sonrasında yüksek performanslı mekanik olarak istifli çok eklemli InGaP/GaAs/Ge güneş hücrelerinin üretilmesi için önemlidir [24].

Sharp [60], tandem CdTe/Ge güneş hücrelerinde kullanım için tek-kristal Ge p-n eklemleri üzerine araştırmalar gerçekleştirmiştir. Bu çalışma boyunca; CdTe'li monolitik ya da mekanik olarak istifli tandem güneş hücreleri için bir taban hücresi olarak Ge'nin yapılabiliğinin gösterilmesi ile ilgilenilmiştir. Yapılan çalışmada; %5,4 AMI,5G enerji dönüşüm verimine sahip bir Ge güneş hücresi bildirilmiştir. Bir Ge alttaşıta yayıcıyı gerçekleştirmek için proximity katkılama tekniği vasıtasıyla fosfor difüzyonu kullanılmıştır. Aktif bölgenin kenarlarını izole etmek ve aygıtı tanımlamak için, bir mesa aşındırma adımı uygulanmıştır. Mesa aşındırma işleminde; bir  $H_2O_2:NH_4OH:H_2O$  solüsyonu kullanılmıştır. a-Si:H/SiN<sub>x</sub>/MgF<sub>2</sub>, birleşik pasivasyon/yansımaya-önleyici kaplama kullanımı dikkate alınmıştır. Pasivasyon/yansımaya-önleyici kaplamanın en üst tabakası MgF<sub>2</sub>'nin reaktif iyon aşındırma (reactive ion etching-RIE) işlemine oldukça dirençli olduğunun bulunduğu bu çalışmada; MgF<sub>2</sub>, kontak kaplaması öncesinde kontak bölgelerini açmak için maske olarak kullanılmıştır. Arka kontak Al'dan yapılmıştır; arka yüzeyde azınlık taşıyıcıların yansımaya (iç yansımaya) hizmet eden ve yalnızca çoğunluk taşıyıcı hollerin rekombine olmasına izin veren bir arka yüzey alanı yani yüksekçe Al katkılı bir Ge bölgesi oluşturmak için tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Güneş hücresinin ön kontakları, krom (Cr) ve Au'dan yapılmıştır [60].

## 8.2. Germanyum (Ge) Güneş Hücresi Üretimi

Üretilen alttaşlarda  $n^+$  yayıcılar oluşturmak için gerçekleştirilen difüzyon işlemleri ve P-difüzyonu derinlik profillerini belirlemek için yapılan SIMS ölçümlerine ait sonuçlar aşağıda ifade edildi.

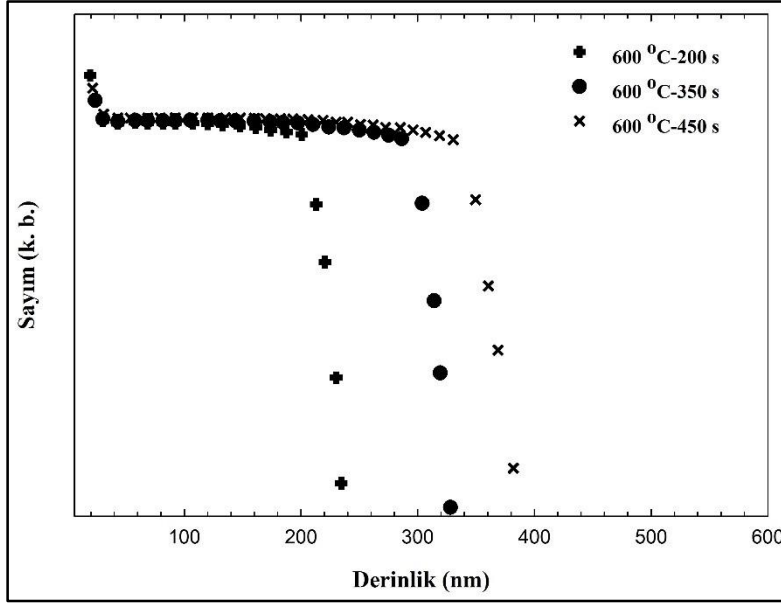
### 8.2.1. Yayıcı difüzyonu

Bir Ge güneş hücresinin yayıcısının kalınlığı ve katkı seviyesi, hücrenin enerji dönüşüm verimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. PC1D yazılım programı kullanılarak elde edilen tek-boyutlu simülasyonların,  $AMI,5G$  spektrumu altında en uygun yayıcı tabakası kalınlığının  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'lük bir katkı seviyesine sahip  $150-300 \text{ nm}$  olduğunu gösterdiği bildirilmiştir [5,9]. Bir Ge alttaşa ince bir yayıcı yapmak için spin-on katkıların kullanımı, iyon implantasyonu ya da CVD-temelli yollara nazaran potansiyel olarak kolay ve göreceli olarak ucuz bir yoldur [2,5,9,16,17].

Bu tez çalışmasında; yayıcı oluşumu için, üretilen p-tipi Ge alttaşlara fosfor-içeren bir SOD (*Filmtronics-P507*) kaynağından fosfor difüzyon işlemleri gerçekleştirildi. Alttaşlar, SOD kaynağı kaplama adımından önce kimyasal temizleme işlemleri ile temizlendi. SOD kaynağı, p-tipi Ge alttaşlar üzerine dönel-kaplama tekniği kullanılarak kaplandı. Daha sonra; SOD-kaplı yüzeye sahip alttaşlar, difüzyon işlemleri gerçekleştirilmeden önce solventleri evapore etmek için bir sıcak plaka kullanılarak  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kürlendi. Alttaşa homojen difüzyonu engelleyen çatlak oluşumundan kaçınmak için,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar  $12 \text{ }^\circ\text{C}/\text{dk}$ 'lik nispeten yavaş bir ısıtma hızı uygulandı. p-tipi Ge numunelerinde  $n^+$  yayıcılar oluşturmak için; difüzyon işlemleri,  $200 \text{ s}$ ,  $350 \text{ s}$  ve  $450 \text{ s}$  etkin difüzyon süreleri esnasında  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta gerçekleştirildi. Difüzyon işlemlerinden sonra; yüzeylerde kalan tabakalar, %48 HF solüsyonu kullanılarak kaldırıldı. P-difüzyonu derinlik profilleri, SIMS ölçümleri ile belirlendi.

#### SIMS analiz sonuçları

$200 \text{ s}$ ,  $350 \text{ s}$  ve  $450 \text{ s}$  etkin difüzyon süreleri esnasında  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta gerçekleştirilen difüzyon işlemlerinin SIMS ölçüm sonuçları, Şekil (8.1)'de verildi. Şekil (8.1)'den görüldüğü üzere; fosfor-difüzyon derinliği, artan etkin difüzyon süresi ile artmaktadır.  $200 \text{ s}$  etkin difüzyon süreli difüzyon işleminden  $\sim 200 \text{ nm}$  difüzyon derinliği elde edilmiştir.



Şekil 8.1. Fosfor-difüzyonlu p-tipi Ge numunelerin SIMS ölçüm sonuçları

200 s etkin difüzyon süresi esnasında 600 °C sıcaklıkta P-difüzyonlu SIMS-ölçümü alınmış numuneden başka, üretilen p-tipi Ge alttaşlardan bir tanesinde de 200 s etkin difüzyon süresi esnasında 600 °C sıcaklıkta P-difüzyonu gerçekleştirildi. Yüzeyde kalan tabaka, %48 HF solüsyonu kullanılarak kaldırıldı. Elde edilen numune, Ge güneş hücresi yapısı olarak kullanıldı.

### 8.2.2. Arka kontak ve arka yüzey alanı (BSF)

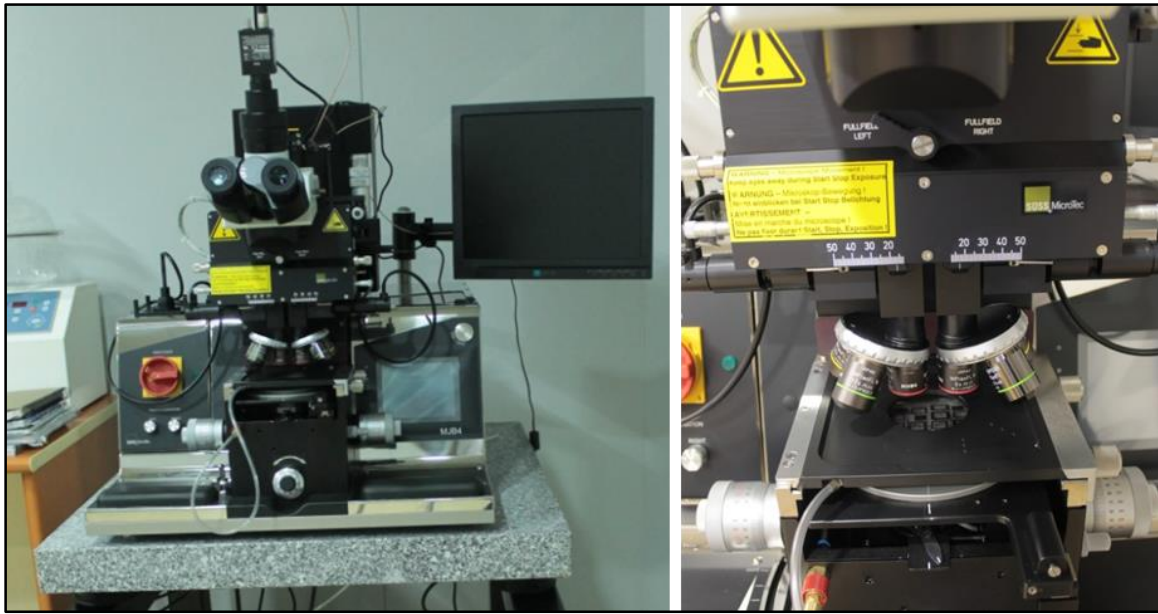
Arka kontak ve arka yüzey alanı için kullanılan maske hizalama sistemine, termal buharlaştırma sistemine ve gerçekleştirilen çalışmalara ait bilgiler aşağıda ifade edildi.

#### Maske hizalama sistemi

Fotolitografi işlemi, UV ışıkla fotorezistin kurlenmesi olarak ifade edilebilir. Maske numune hizalama ve fotolitografi işlemleri, aynı sistem ile gerçekleştirilmektedir. Sistemde bulunan bir UV ışık kaynağı yardımı ile numune üzerine kaplanmış olan fotorezistin üretilmesi hedeflenen aygıt yapısına uygun olarak geliştirilen fotomaske kullanılarak pozlanması gerçekleştirilmektedir. Pozlama işlemi sayesinde; fotomaskede bulunan desenler fotoreziste dolayısıyla numune yüzeyine aktarılmış olur. Maske hizalama sisteminin optik kısmı, ışık kaynağı olarak 350-450 nm dalgaboylu Hg ark lambasına (UV400) sahiptir. UV ışık, uygun

ayna ve merceklerden meydana gelen optik sistem aracılığıyla numune yüzeyine yönlendirilir. Maske ve numune uyumluluğu olarak ifade edilen maske ve numune hizalama işlemi, sistem üzerindeki mikroskop aracılığıyla yapılmaktadır. Numune tutucu, x, y ve z eksenlerinde hareket ettirilerek; maske ve numune hizalama işlemi gerçekleştirilir. [83].

Bu tez kapsamında; üretilen pn-eklem Ge güneş hücresinin fabrikasyon işleminde, arka kontak ve arka yüzey alanı, mesa aşındırma ve ön kontak metalizasyonu işlemlerinde, Resim (8.1)'de sunulan, SUSS Micro Tech-MJB4 model maske hizalama sistemi kullanıldı.



Resim 8.1. Maske hizalama sistemi (Gazi Fotonik)

### Termal buharlaştırma sistemi

Termal buharlaştırma sistemi, dört adet manuel değiştirilebilir kayık potalar vasıtasıyla buharlaştırma işlemi için bir kaplama haznesinden oluşur. Buharlaştırma işlemi için dört farklı pota kullanmak mümkündür. Aynı anda yalnızca tek potadan buharlaştırma işlemine izin veren sistem, bütün sistem bileşenlerinin manuel kontrol edilebileceği şekilde tasarlanmıştır. Maksimum  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik ısıtıcılı döner numune tutucu bulunmaktadır. Numune tutucu, yaklaşık  $60\text{ rpm}$ 'lik dönebilme kabiliyetine sahiptir. Buharlaştırma ile kaplama işlemi esnasında; kaplama kalınlığını ölçmek için Mastek kalınlık monitör kullanılmaktadır. Buharlaştırma sistemi, kapalı devre harici su soğutma sistemi ile desteklenmektedir.

Bu tez kapsamında; arka kontak ve arka yüzey alanı işlemleri, Resim (8.2)'de sunulan, Bestec HV buharlaştırma sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.



Resim 8.2. Buharlaştırma sistemi (Gazi Fotonik)

#### Arka kontak ve arka yüzey alanı (BSF) işlemleri

Ge güneş hücresinin arka taraf işlemi, arka yüzeyin fotolitografik işlem ile bir kare şekile desenlenmesinin ardından; desenlenen arka yüzeye Al buharlaştırılması ve sonrasında yüksekçe katkılı bir p-tipi bölgesi yani Al-arka yüzey alanı (Al-BSF) oluşturmak için ötektik sıcaklık üzerinde tavllanması ile gerçekleştirildi.

AZ5214 fotorezist malzeme, dönel kaplama tekniği kullanılarak numunenin arka yüzeyine 40 s süre içinde 3500 rpm ile kaplandı. Ardından; fotorezist kaplı numune bir sıcak tabla aracılığıyla 110 °C'de 50 s boyunca kürlendi. Bu işlem, fotorezist malzemedeki solventlerin buharlaşması ve böylece fotorezistin yüzeye daha iyi tutunması için gerçekleştirildi. Maske hizalama sistemi ile kullanılacak fotomaske ve numune birbirlerine hizalandı ve fotorezist kaplı yüzey 30 s süresince UV ışık ile pozlanarak fotolitografi işlemi yapıldı. Bu işlem

gerçekleştirildikten sonra; maske hizalama sisteminden çıkartılan numune, hazırlanan developer çözeltilisine koyularak numunenin arka yüzeyinde hedeflenen desen oluşturuldu. Bu işlemin ardından; buharlaştırma sistemi aracılığıyla Al kaplama işlemi yapıldı. Kaplama işleminin ardından; numune, sistemden çıkartıldı ve lift-off işlemi için asetona koyuldu. Lift-off işleminin ardından; gerekli işlemlerin yapılmasını takiben, tavlama işlemi ile arka yüzey alanının gerçekleştirilmesi amacıyla numune tekrardan Al kaplama işleminin yapıldığı buharlaştırma sistemine yüklendi ve tavlama işlemi gerçekleştirildi.

### **8.2.3. Mesa aşındırma**

Aktif bölgeyi oluşturmak için, fotolitografi (ön yüzeyi desenleme için) ve kimyasal aşındırmayı içeren mesa aşındırma işlemi gerçekleştirildi.

*AZnLof-2070* kalın fotorezist malzeme, dönel kaplama tekniği ile numunenin ön yüzeyine 40 s süre içinde 1500 rpm ile kaplandı. Kaplama işleminin ardından; fotorezistteki solventlerin buharlaşması ve böylece fotorezistin yüzeye daha iyi tutunması için, numune bir sıcak tabla kullanılarak 120 °C'de 90 s boyunca kürlendi. Maske hizalama sistemi kullanılarak; mesa aşındırma işlemi için kullanılacak fotomaske ve numune birbirlerine hizalandı ve fotorezist kaplı yüzey 25 s boyunca UV ışık ile pozlanarak fotolitografi işlemi gerçekleştirildi. Fotolitografi işleminin ardından; maske hizalama sisteminden çıkartılan numune, hazırlanan developer çözeltilisine koyularak numune yüzeyinde hedeflenen desen oluşturuldu. Kimyasal aşındırma işlemi, bir NH<sub>4</sub>OH:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O solüsyonu kullanılarak gerçekleştirildi. Kimyasal aşındırma işleminin ardından; numune, aseton içine koyularak yüzeydeki fotorezist kaldırıldı.

### **8.2.4. Ön kontak metalizasyonu**

Ön kontak metalizasyonu işlemi için, kullanılan termal buharlaştırma sistemine ve gerçekleştirilen çalışmalara ait bilgiler aşağıda belirtildi.

#### Termal buharlaştırma sistemi

*NANOVAK-NVTH 350* kodlu kutu tipi buharlaştırma sistemi, 304 paslanmaz çelikten yapılan, 30x30x35 cm<sup>3</sup> kutu boyutlu, temiz, elektro-kaynaklı parlatılmış yüzeylere sahip

prizmatik vakum haznesine dayandırılır. Maksimum  $350^{\circ}C$ 'lik ısıtıcı döner numune tutucu bulunmaktadır.  $3-30\ rpm$  ayarlanabilir numune döndürme birimi mevcuttur. Otomatik kapalı devre harici su soğutma birimi ile desteklenen sistemde, dört adet ısı buharlaştırma potası bulunmaktadır. Aynı anda iki pota aracılığıyla buharlaştırma işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Buharlaştırma ile kaplama işlemi esnasında kalınlık ölçümü, McVac kalınlık monitörü kullanılarak gerçekleştirilmektedir.



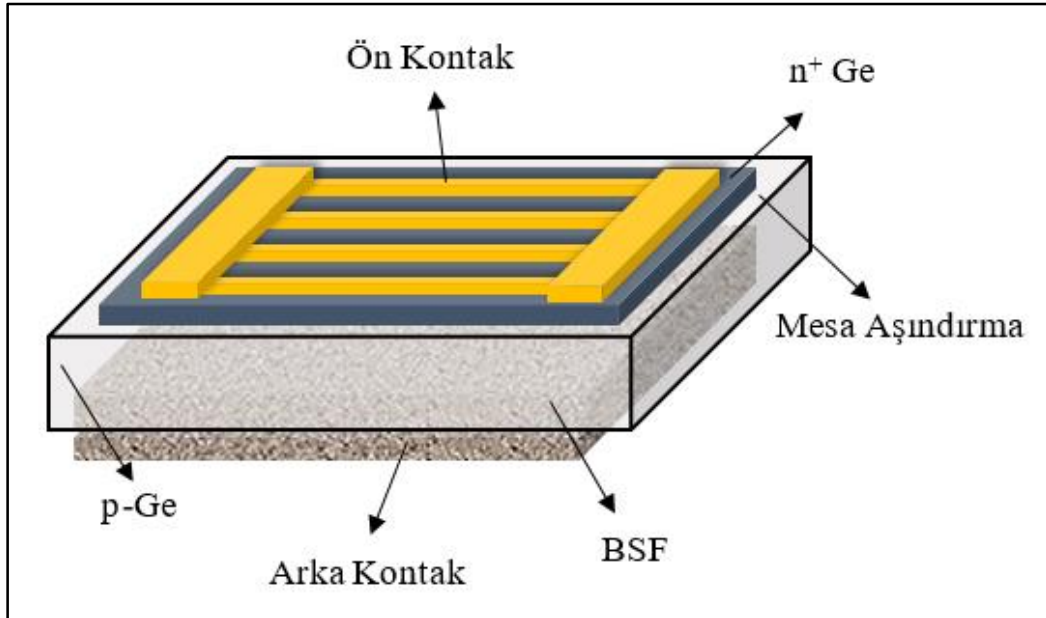
Resim 8.3. Buharlaştırma sistemi (Gazi Fotonik)

Bu tez çalışması kapsamında; ön kontak metalizasyonu işlemi, Resim (8.3)'te sunulan, *NANOVAK-NVTH 350* buharlaştırma sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.

### Ön kontak metalizasyonu işlemi

Mesa aşındırma işlemi ile aktif bölge oluşturulduktan sonra; sınırlandırılmış ön yüzey, fotolitografik işlem ile ince ve toplayıcı gridlere sahip bir şekile desenlendi. Desenlenmiş sınırlı ön yüzeye, AuNiGe buharlaştırması ile bir ön kontak metalizasyonu işlemi gerçekleştirildi.

AZ5214 fotorezist malzeme, dönel kaplama tekniği ile numunenin n yüzeyine 40 s süre içinde 3500 rpm ile kaplandı ve kaplama işlemine ardından; fotorezist kaplı numune, bir sıcak tabla vasıtasıyla 110 °C’de 50 s süresince kürlendi. Maske hizalama sistemi kullanılarak; n kontak metalizasyonu işlemi için kullanılacak fotomaske ve numune birbirlerine hizalandı ve fotorezist kaplı yüzey 30 s süresince UV ışık ile pozlanarak fotolitografi işlemi gerçekleştirildi. Bu işlemin yapılmasının ardından; numune, maske hizalama sisteminden çıkartıldı ve hazırlanan developer çözeltisine koyularak numune yüzeyinde hedeflenen desen oluşturuldu. Desenin oluşturulmasının ardından; buharlaştırma sistemi kullanılarak AuNiGe kaplama işlemi gerçekleştirildi. Kaplama işleminin ardından; sistemden çıkartılan numune, aseton içine koyularak lift-off işlemi gerçekleştirildi.



şekil 8.2. Üretilen Ge güneş hücresinin şematik gösterimi

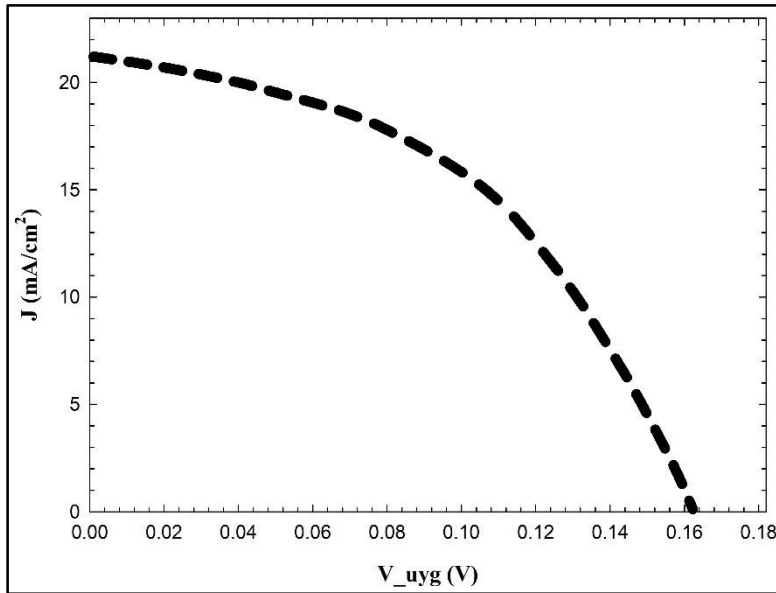
Fabrikasyon süreci tamamlanan Ge güneş hücresinin şematik gösterimi, şekil (8.2)’de sunuldu. Üretilen Ge güneş hücresinin  $I-V$  lmleri; 298 K ortam sıcaklığında, AM1,5G spektrum,  $I$ -güneş aydınlatması altında gerçekleştirildi.

### 8.3. Akım-Gerilim ( $I-V$ ) Analiz Sonuçları

Bu çalışmada üretilen Ge güneş hücresinin  $J-V$  eğrisi, şekil (8.3)’te verildi. Işımalı rekombinasyon, Auger rekombinasyonu, Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyonu ve yüzey rekombinasyonu, başlıca taşıyıcı rekombinasyonu süreçleridir [9,18,29]. Işımalı

rekombinasyon ve Auger rekombinasyonu, önlenemez süreçlerdir ve kusursuz yarıiletkenlerde bile meydana gelirler [67]. Ge gibi dolaylı enerji-bant aralıklı yarıiletken malzemelerde, ışmalı rekombinasyonun gerçekleşme olasılığı yok denecek kadar az hatta hiç yoktur bile denilebilir [9,18,60]. Yarıiletken malzemelerdeki örgü kusurları ve safsızlıklar tarafından sebep olunan bant aralığındaki izinli enerji seviyeleri aracılığıyla meydana gelen SRH rekombinasyonunun etkisi, hiç ya da yalnızca biraz kusurları olan yüksek kaliteli bir malzemede büyük bir etkiye sahip olmayacaktır [9]. Taşıyıcı rekombinasyonu, yarıiletken kristal yüzeyinde de meydana gelir. Yarıiletken yüzeyinde kristal örgünün simetrisi bozulur; bu durum bant aralığı içinde yüzey durumlarına yol açan geniş bir miktarda doymamış ya da sözde asılı bağlara sebep olur [9,89,90]. Yüzey rekombinasyonu, güneş hücresi performansını etkileyen önemli bir olaydır [5,9,16,17,60,86,87,88,91-93]. Yüzey rekombinasyon hızlarını azaltmak için ön ve arka yüzeyleri esaslı bir şekilde pasivize etmek gerekmektedir [5,60]. Böyle esaslı bir şekilde elde edilen pasivasyon, yüksekçe verimli Ge güneş hücrelerini gerçekleştirmek için gereklidir [5]. Yüzey durumlarının miktarı, yüzey rekombinasyon hızını belirler ve iki yol ile azaltılabilir. İlk yöntem, asılı bağları doldurarak yüzey durumlarının miktarını doğrudan azaltan bir pasivasyon filminin uygulanmasıdır. İkinci bir yöntem, bir taşıyıcı türünü geri püskürterek yüzey yakınında ya elektronların ya da hollerin miktarını azaltmaktır. Bu işlem, ya p-tipi bir yarıiletken malzemede yüksekçe katkılı bir p-tipi bölgesi oluşturma ile ya da yalıtkan bir tabakanın uygulanması ile elde edilebilir [9]. Güneş hücresi aydınlatıldığı zaman; gelen ışığın bir kısmı, yarıiletken ve havanın kırıcılık indislerindeki fark nedeniyle yansımaya uğrar. Yüzey yansımaları ile sebep olunan optik kayıplar, bir güneş hücresi tarafından üretilen fotoakımın miktarını olumsuz olarak etkiler. Yüzeydeki yansımaları azaltmak için yansımaya-önleyici bir kaplama kullanılabilir [18,67]. Optimize edilmiş bir yansımaya-önleyici kaplama uygulaması, hücredeki fotoakımı ve böylece güneş hücresinin performansını artırır [9,16,23,24,60].  $n^+$  yayıcı oluşumu ve arka taraf işlemi için *Ref. [5]* ve *Ref. [88]*'de bildirilen yöntemler, bu çalışmada Ge güneş hücresi fabrikasyon işleminde uygulandı; fakat ön yüzey üzerinde hiçbir pasivasyon tabakası kaplama işlemi gerçekleştirilmedi. Ayrıca; fabrikasyon esnasında hiçbir yansımaya-önleyici kaplama işlemi de uygulanmadı. Bu çalışmada; p-tipi Ge alttaşıta yayıcı oluşumu için, *Filmtronics-P507* spin-on katkı kaynağından fosfor-difüzyonu uygulanmıştır. Arka taraf işlemi, ya sürekli bir BSF oluşturmak için tavlama işlemi ile takip edilen Al buharlaştırılması ya da bir lazer ile lokal ısıtma aracılığıyla takip edilen Al kaplaması ile gerçekleştirilebilir [9,18,88]. Daha iyi bir arka yüzey rekombinasyon hızının, yüzey alanın çoğunluğu pasivize edilirken; lokal

kontakların gerçekleştirildiği nispeten karmaşık bir hücre tasarımı kullanılarak elde edilebileceği literatürde bildirilmiştir [9,18,24,88]. PECVD a-Si:H'nin, Ge için çok etkili bir pasivasyon malzemesi olduğu kanıtlanmıştır [88]. Ge güneş hücreleri için, yansıtıcılığı artırmak amacıyla; muhtemelen bir PECVD dielektrik tabaka ile birlikte a-Si uygulanabilir [9,88]. Bu çalışmada; yüksekçe katkılı p-tipi bölgesi gerçekleştirmek için Al kullanarak sürekli bir BSF yapısı üzerinde çalışılmıştır. Yüksekçe katkılı bölge, elektronların güneş hücresinin arka tarafına hareketini engelleyecek, yalnızca az miktarda elektron arka tarafa ulaşabileceğinden dolayı yüzey rekombinasyonu azaltılacaktır [9]. Bir güneş hücresinin performansının değerlendirilmesine ve başka aygıtlarla kıyaslanmasına izin veren, güneş hücresi aygıt karakteristiklerinden çıkartılabilen birkaç önemli parametre vardır. Bu parametreler, kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi, dolun faktörü ve enerji dönüşüm verimi olarak özetlenebilirler [18]. *Ref.[5]* ve *Ref.[88]*'de bildirilen Ge PV hücreleri ve bu çalışmada üretilen Ge güneş hücresi için  $I$ - $V$  karakterizasyonu sonuçları, Çizelge (8.1)'de verildi. Ayrıca; 298 K sıcaklıkta, AM1,5G spektrumu,  $I$ -güneş aydınlatması altında elde edilen teorik sonuçlar da, Çizelge (8.1)'de sunuldu. Çizelge (8.1)'den görüldüğü üzere; bildirilen Ge PV hücreleri, bu çalışmada üretilen Ge güneş hücresine nazaran daha yüksek kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi, dolun faktörü ve enerji dönüşüm verimi değerleri sergilemektedir.



Şekil 8.3 Üretilen Ge güneş hücresinin  $J$ - $V$  eğrisi

Çizelge 8.1. Teorik ve deneysel olarak elde edilen performans parametreleri

$V_{oc}$ (V)	$J_{SC}$ ( $mA/cm^2$ )	$FF$ (%)	$\eta$ (%)	
0.340	52.731	74.321	13.313	<i>bu çalışma (teorik)</i>
0.162	21.200	46.100	1.586	<i>bu çalışma (deneysel)</i>
0.269	46.400	62.400	7.800	<i>[5](deneysel)</i>
0.264	43.200	69.300	7.900	<i>[88](deneysel)</i>

Kısa devre akımı, aygıt tarafından soğurulan fotonların sayısı ile ilişkilidir. Gelen fotonların aygıtta soğurulmaları ve yansıma ya da verimsiz soğurma nedeniyle kaybedilmemeleri sağlanarak, yeterli toplamanı gerekmektedir. Güneş hücresi performansına katkı sağlayabilecek enerjiye sahip gelen fotonlar içinde, soğurulamayanların arka yüzeyde yansıtılması ve dolayısıyla aygıt içinden ikinci ya da daha ilerideki bir geçişi üzerinde aygıt tarafından soğurulmasının yanı sıra ön yüzey ve atmosfer arasındaki optik uyumsuzluk nedeniyle ön yüzeyden yansıma sonucu oluşan foton kayıplarının da engellenmesi sağlanmalıdır. İç yansıma nedeniyle fotonları tuzaklayan ve aygıtın içinde onları hapsi tutan bir ışık tuzaklama tasarımı performansın artırılmasına sebep olabilir [60,88]. Bu çalışmada üretilen Ge güneş hücresine nazaran bildirilen hücrelerin daha büyük kısa devre akım yoğunluğu değerleri, bu hücrelerin yansıma kayıpları, seri direnç ve şönt direnç tarafından sebep olunan ohmik kayıplar, ön metal kaplama tarafından sebep olunan gölgeleme kayıpları, ve rekombinasyon kayıpları tarafından daha az sınırlandırılmış olabileceğini belirtir [5,9,28,60]. Yüzey pasivasyonu ve yansıma-önleyici teknolojisi, kısa devre akım yoğunluğu parametresi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [5,60,93]. Açık devre gerilimi, bir güneş hücresindeki bütün rekombinasyon bakımından en hassas güneş hücresi parametresidir [93-97]. Genellikle; açık devre gerilimi parametresini belirleyen temel süreç rekombinasyondur ve pratik bir güneş hücresinde ters doyum akım yoğunluğu parametresi, güneş hücresinin bütün bölgelerinde meydana gelen toplam rekombinasyonun doğrudan bir ölçüsü olarak düşünülebilir [23,30,67,73,93-96]. Yüksek bir açık devre gerilimi için, kesinlikle düşük bir ters doyum akım yoğunluğu gerekmektedir [25,28,94]. Bildirilen Ge PV hücrelerin açık devre gerilimi değerlerine kıyasla, bu çalışmada elde edilen Ge güneş hücresinin daha düşük açık devre gerilim değeri, bu hücrenin daha fazla rekombinasyon kaybına maruz kalmış olabileceğini ve bundan dolayı ters doyum akım yoğunluğu değerinin

üretilebilir Ge güneş hücresinde daha yüksek olabileceğine işaret eder. Dolum faktörü parametresi, şönt direnç, seri direnç ve diyot özellikleri tarafından etkilenebilir [23,60,79,93]. Güneş hücresinin dolum faktörü parametresini belirleyen faktörler, ohmik kayıplar ve rekombinasyon kayıplarını içermektedir [23,30,41,60,79,93]. Bildirilen Ge PV hücrelerin dolum faktörü değerlerine nazaran bu çalışmada elde edilen Ge güneş hücresinin daha düşük dolum faktörü değeri, bu hücrenin daha düşük şönt dirence, daha yüksek seri dirence ve daha yüksek rekombinasyona sahip olabileceğini belirtmektedir [79,93]. Dolum faktörünü optimize etmek için düşük rekombinasyon kayıplarına, düşük seri dirence ve yüksek şönt dirence ihtiyaç duyulur [60]. *Ref. [88]*'de izah edildiği gibi; bildirilen Ge PV hücreleri, uygulanan pasivasyonların çok yüksek bir kaliteye sahip olduğunu belirten mükemmel açık devre gerilimi ve dolum faktörü değerleri göstermektedir. Ayrıca; bildirilen çalışmalarda elde edilen iyi ve yeniden üretilebilir dolum faktörü değerleri, uygulanan kontak gerçekleştirme işlemlerinin yüksek kalitesini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak; bildirilen Ge PV hücrelerin enerji dönüşüm verim değerlerine nazaran bu çalışmada bulunan daha düşük enerji dönüşüm verimi değeri, bu çalışmadaki daha küçük kısa devre akım yoğunluğu, açık devre gerilimi ve dolum faktörü değerleri nedeniyle elde edilir. Bu çalışmada; elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar arasında büyük farklar vardır. Deneysel olarak elde edilen değerlerin çok daha küçük olduğu, Çizelge (8.1)'den görülmektedir. Pratik bir güneş hücresinin performansı, termalizasyon, yansıma, ohmik, gölgeleme, rekombinasyon, iç yansıma kayıpları v.b. kayıp mekanizmaları tarafından sınırlandırılabilir [28,43,77,98]. Deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçlar arasındaki bu önemli farklar, hem teorik çalışmalarda ideal durumların kullanımı hem de üretilebilir Ge güneş hücresinin performansını olumsuz olarak etkilediği düşünülen kayıp mekanizmalarından meydana gelmiş olabilir. Bu kayıp mekanizmalarının araştırılması, Ge güneş hücresinin performansını geliştirme için büyük önem arz eder. Bir Ge güneş hücresi fabrikasyonunda; bu kayıp mekanizmalarının etkisini azaltma çalışmaları, güneş hücresi performansını artırabilir.

## 9. SONUÇLAR

Ge güneş hücresinin performans parametrelerinin ( $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$ ) sıcaklık bağımlılığı, teorik olarak araştırıldı. Teorik çalışmalar için analitik güneş hücre modeli kullanıldı.  $200\text{ K}$ 'den  $400\text{ K}$ 'ye kadar sıcaklık aralığında gerçekleştirilen çalışmalarda;  $J_{SC}$  değerinin,  $42,549\text{ mA/cm}^2$ 'den  $62,740\text{ mA/cm}^2$ 'ye arttığı;  $V_{OC}$  değerinin,  $0,497\text{ V}$ 'den  $0,120\text{ V}$ 'ye,  $FF$  değerinin  $\%85,285$ 'ten  $\%52,566$ 'ya ve  $\eta$  değerinin ise  $\%18,028$ 'den  $\%3,970$ 'e azaldığı belirlendi.  $298\text{ K}$  sıcaklıkta yapılan çalışmalar neticesinde;  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$  parametreleri değerlerinin sırasıyla  $52,731\text{ mA/cm}^2$ ,  $0,340\text{ V}$ ,  $\%74,321$  ve  $\%13,313$  olduğu tespit edildi. Artan sıcaklıkla  $J_{SC}$ 'nin artmasına rağmen;  $V_{OC}$ 'deki azalma ve  $FF$ 'teki ilişkili azalmadan dolayı,  $\eta$  azaldı. Böylece; çalışma sıcaklığını artırmanın, Ge güneş hücresinin performansını olumsuz yönde etkilediği görüldü. Güneş hücrelerinin performansı üzerindeki olumsuz etkisinden dolayı; PV uygulamalarında istenmeyen bir faktör olarak ifade edilen çalışma sıcaklığındaki artış, PV uygulamaları için sıcaklığı mümkün olduğunca düşük tutmak amacıyla uygun soğutma sistemleri için ihtiyacı gösterir.

Ge güneş hücresi fabrikasyon işleminde kullanmak için;  $170\text{ }\mu\text{m}$  kalınlıklı,  $(100)$ -yönelimli, yüzey morfolojisi açısından güneş hücresi gibi hassas elektro-optik aygıt üretiminde kullanılabilir kaliteye sahip, düşük öz dirençli ( $0,035\text{ }\Omega\text{cm}$ ) p-tipi tek-kristal Ge alttaş üretimi hedeflendi.  $10\text{ kg}$  poli-kristal Ge külçe ve  $\sim 1\text{ g}$  Ga katkısı kullanılarak Ga katkılı Ge tek-kristal külçesi, Cz büyütme tekniği aracılığıyla büyütüldü. Tek-kristal külçe, elmas tel testere sistemi kullanılarak dilimlendi. Lepleme ve parlatma sistemi aracılığıyla; tek-kristal külçenin gövde kısmından kesilen dilimin arka yüzeyi leplenirken, ön yüzeyinin ise leplenme ve parlatılması işlemleri gerçekleştirildi. İşlenmiş yüzeylere sahip olan hedeflenen uygun kalınlıklı bir dilim elde edildi.

Elde edilen dilimin yapısal karakterizasyonu, X-ışını kırınım analizi ile belirlendi. Tek bir pikin gözleendiği X-ışını kırınım deseninde; dilimin,  $2\theta=65,91^\circ$  açı değerinde şiddetli ve keskin bir pik sergilediği görüldü. Bu sonuç, dilimin hedeflenen yönelim ile tek-kristalize olduğuna işaret etmektedir. FWHM değerinin  $0,033^\circ$  olduğu saptandı. Düzlemlerarası mesafe ve örgü sabiti değerlerinin sırasıyla  $1,416\text{ Å}$  ve  $5,664\text{ Å}$  olduğu belirlendi. Bragg açısı ( $\theta$ ), düzlemlerarası mesafe ve örgü sabiti değerlerindeki küçük farklar, kullanılan Ga katkısıyla ilişki olabilir. Parçacık boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve mikro-gerilme

değerlerinin sırasıyla  $286,898 \text{ nm}$ ,  $1,215 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  ve  $9,871 \times 10^{-5}$  olduğu belirlendi. Dilimin yüksek kristal kalitesine sahip olduğunu gösteren düşük FWHM değeri ( $0,033^\circ$ ), kristaldeki büyük parçacık boyutu, düşük dislokasyon yoğunluğu ve düşük mikro-gerilme ile ilişkilendirilebilir. Dilim, X-ışını kırınım ölçümünün ardından kare şekilli parçalara bölündü.

Üretilen kare şekilli alttaşlardan bir tanesinin yüzey morfolojisi, atomik kuvvet mikroskopu sistemi kullanılarak incelendi.  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ,  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  ve  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 'lik her bir yüzey alanında taranan ilgili AFM görüntülerinden hesaplanan RMS değerlerinin sırasıyla  $0,23 \text{ nm}$ ,  $0,29 \text{ nm}$  ve  $0,47 \text{ nm}$  olduğu görüldü. Alttaşın  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ ,  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  ve  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 'lik yüzey alanlarında taranan 3D AFM görüntüleri ve RMS değerleri, yüzeyin homojenlik ve düzgünlük bakımından çok iyi bir kaliteye sahip olduğunu ifade etmektedir. Elde edilen sonuçlardan; Ga katkılamanın homojen olduğu sonucu çıkarılabilir. Gerçekleştirilen AFM ölçümleri neticesinde; üretilen alttaşın, yüzey morfolojisi açısından güneş hücresi gibi hassas elektro-optik aygıt üretiminde kullanılabilecek kaliteye sahip olduğu ifade edilebilir.

Üretilen kare şekilli alttaşın elektriksel özellikleri, Hall etkisi ölçüm sistemi vasıtasıyla incelendi. Van der Pauw yöntemi kullanılarak; özdirenç ve Hall etkisi ölçümleri yaklaşık olarak  $300 \text{ K}$  sıcaklıkta gerçekleştirildi. Hall etkisi ölçümü,  $0,4 \text{ T}$ 'lik sabit manyetik alan altında yapıldı. Ölçümleri yapılan alttaşın Hall etkisi ölçümüyle elde edilen Hall katsayısının, alttaşta çoğunluk serbest taşıyıcının hol olduğunu yani alttaşın p-tipi özellik gösterdiğini ifade eden pozitif davranış sergilediği tespit edildi. Özdirenç ve Hall etkisi ölçümleri sonucunda; üretilen alttaşın  $0,028 \Omega\text{cm}$ ,  $20,776 \text{ cm}^3/\text{C}$ ,  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ve  $733,44 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  olan sırasıyla özdirenç, Hall katsayısı, Hall taşıyıcı yoğunluğu ve Hall taşıyıcı mobilitesi değerlerine sahip olduğu görüldü. Belirlenen elektriksel karakterizasyonlar sonucunda; üretilen alttaşın, hedeflenene uygun p-tipi Ge alttaş olduğu tespit edildi.

Üretilen p-tipi Ge numunelerinden bir tanesinin alttaş olarak kullanıldığı bir Ge güneş hücresi fabrikasyon işlemi gerçekleştirildi. Üretilen p-tipi Ge alttaşlarda yayıcı difüzyonu işlemleri, *Filmtronics-P507* SOD kaynağı kullanılarak yapıldı. Üretilen p-tipi Ge alttaşlarda  $n^+$  yayıcılar oluşturmak için  $200 \text{ s}$ ,  $350 \text{ s}$  ve  $450 \text{ s}$  etkin difüzyon süreleri esnasında  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta gerçekleştirilen difüzyon işlemlerinin ardından; P-difüzyonu derinlik profilleri, SIMS ölçümleri ile belirlendi. P-difüzyonu derinliğinin artan etkin difüzyon süresi ile arttığı tespit edildi.  $200 \text{ s}$  etkin difüzyon süresi esnasında  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta gerçekleştirilen

difüzyon işleminden  $\sim 200$  nm difüzyon derinliği elde edildi. 200 s etkin difüzyon süresi esnasında  $600$  °C sıcaklıkta P-difüzyonlu bir numune, Ge güneş hücresi yapısı olarak kullanıldı. Ge güneş hücresi fabrikasyon işleminde; arka taraf işlemi, sonrasında yüksekçe katkılı bir p-tipi bölgesi yani Al-arka yüzey alanı oluşturmak için ötektik sıcaklık üzerinde tavlama işlemli, fotolitografik işlem ile bir kare şekile desenlenen arka yüzeye Al buharlaştırılarak gerçekleştirildi. Daha sonra; fotolitografi ve kimyasal aşındırma işlemlerini içeren, mesa aşındırma işlemi gerçekleştirildi. Mesa aşındırma işlemi ile aktif bölge oluşturulduktan sonra; bir ön kontak metalizasyon işlemi, fotolitografik işlem ile ince ve toplayıcı gridlere sahip bir şekile desenlenen, sınırlandırılmış ön yüzeye AuNiGe buharlaştırılması ile gerçekleştirildi. Üretilen Ge güneş hücresinin  $I$ - $V$  karakteristiği,  $298$  K ortam sıcaklığında,  $AM1,5G$  spektrum,  $I$ -güneş aydınlatması altında belirlendi.

Üretilen Ge güneş hücresinin performans parametreleri,  $I$ - $V$  ölçümlerinden belirlendi. Üretilen hücrenin  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $FF$  ve  $\eta$  parametreleri değerlerinin sırasıyla  $21,2$  mA/cm<sup>2</sup>,  $0,162$  V,  $\%46,1$  ve  $\%1,586$  olduğu görüldü. Belirlenen deneysel sonuçlar, literatürdeki deneysel sonuçlarla ve bu çalışmada elde edilen teorik sonuçlarla kıyaslandı. Üretilen Ge güneş hücresine nazaran literatürde bildirilen Ge güneş hücrelerin daha büyük  $J_{SC}$  değerleri, bildirilen hücrelerin yansıma kayıpları, ohmik kayıplar, gölgeleme kayıpları ve rekombinasyon kayıpları tarafından daha az sınırlandırılmış olabileceğini belirtir. Bildirilen Ge güneş hücrelerin  $V_{OC}$  değerlerine kıyasla üretilen Ge güneş hücresinin daha düşük  $V_{OC}$  değeri, bu hücrenin daha fazla rekombinasyon kaybına maruz kalmış olabileceğini ve bu nedenle  $J_0$  değerinin üretilen Ge güneş hücresinde daha yüksek olabileceğini gösterir. Bildirilen Ge güneş hücrelerin  $FF$  değerlerine nazaran üretilen Ge güneş hücresinin daha düşük  $FF$  değeri, bu hücrenin daha düşük şönt dirence, daha yüksek seri dirence ve daha yüksek rekombinasyona sahip olabileceğine işaret eder. Sonuç olarak; bildirilen Ge güneş hücrelerin  $\eta$  değerlerine kıyasla bu çalışmada bulunan daha düşük  $\eta$  değeri, bu çalışmadaki daha düşük  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$  ve  $FF$  değerlerinin sonucudur. Teorik ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar arasında görülen büyük farklar, hem teorik çalışmalarda ideal durumların kullanımı hem de üretilen Ge güneş hücresi performansını kötü bir şekilde etkilediği düşünülen termalizasyon, yansıma, ohmik, gölgeleme, rekombinasyon, iç yansıma kayıpları v.b. kayıp mekanizmalarından meydana gelmiş olabilir. Ge güneş hücresi fabrikasyonu esnasında; bu kayıp mekanizmalarının etkisini azaltabilen işlemler, güneş hücre performansını artırmak için gerçekleştirilmelidir.

Bu tez çalışması kapsamında; Cz hacimli tek-kristal büyütme tekniğiyle Ge tek-kristal külçe üretiminden, Ge güneş hücresi üretimine kadar gerçekleştirilen çalışmaların ve elde edilen sonuçların, *III-V* grubu bileşik yarıiletken çok eklemlı güneş hücreleri için önemli olduğu düşünölmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Claeys, C. and Simoen, E. (2007). *Germanium Materials, Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices* (First Edition). The Netherlands: Elsevier, 11-37.
2. Boldrini, V., Carturan, S. M., Maggioni, G., Napolitani, E., Napoli, D. R., Camattari, R. and Salvador, D. De. (2017). Optimal process parameters for phosphorus spin-on-doping of germanium. *Applied Surface Science*, 392, 1173-1180.
3. Bosi, M. and Attolini, G. (2010). Germanium: Epitaxy and its applications. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 56, 146-174.
4. Moskovskih, V. A., Kasimkin, P. V., Shlegel, V. N., Vasiliev, Y. V., Gridchin, V. A. and Podkopaev, O. I. (2014). The low thermal gradient CZ technique as a way of growing of dislocation-free germanium crystals. *Journal of Crystal Growth*, 401, 767–771.
5. Posthuma, N. E., van Der Heide, J., Flamand, G. and Poortmans, J. (2007). Emitter formation and contact realization by diffusion for germanium photovoltaic devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 54(5), 1210-1215.
6. Taishi, T., Ise, H., Murao, Y., Osawa, T., Suezawa, M., Tokumoto, Y., Ohno, Y., Hoshikawa, K. and Yonenaga, I. (2010). Czochralski-growth of germanium crystals containing high concentrations of oxygen impurities. *Journal of Crystal Growth*, 312, 2783–2787.
7. Taishi, T., Hashimoto, Y., Ise, H., Murao, Y., Ohsawa, T. and Yonenaga, I. (2012). Czochralski growth techniques of germanium crystals grown from a melt covered partially or fully by liquid B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Crystal Growth*, 360, 47–51.
8. Bao, Y., Sun, K., Dhar, N. and Gupta, M. C. (2014). Germanium p-n Junctions by Laser Doping for Photonics/Microelectronic Devices. *IEEE Photonics Technology Letters*, 26(14), 1422-1425.
9. Posthuma, N. (2006). Highly Efficient Thin Germanium Bottom Cells For Mechanically Stacked Photovoltaic Devices, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.
10. Baek, J. W., Shim, J. and Park, J-H. (2015). Characteristics of Germanium n<sup>+</sup>/p junctions formed by phosphorus diffusion from on indium-gallium-phosphide layer. *Current Applied Physics*, 15, 765-769.
11. Karam, N. H., King, R.R., Cavicchi, T., Krut, D. D., Ermer, J. H., Haddad, M., Cai, L., Joslin, D. E., Takahashi, M., Eldredge, J. W., Nishikawa, W. T., Lillington, D. R., Keyes, B. M. and Ahrenkiel, R. K. (1999). *IEEE Transactions on Electron Devices*, 46, 2116-2125.
12. Shim, J., Song, I., Jung, W. S., Nam, J., Leem, J. W., Yu, J. S., Kim, D. E., Cho, W. J., Kim, Y. S., Jun, D. H., Heo, J., Park, W., Park, J. H. and Saraswat K.C. (2013). *IEEE Electron Device Lett.*, 34, 15-17.

13. Kabacelik, I. and Turan, R. (2013). *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, 15, 948-953.
14. Shim, J., Shim, J. H., Lee, I. Y., Choi, D., Baek, J. W., Heo, J., Park, W., Leem, J. W., Yu, J. S., Jung, W. S., Saraswat, K. and Park, J. H. (2013). *J. Appl. Phys.*, 114, 094515.
15. Andreev, V. M., Khvostikov, V. P., Kalyuzhnyi, N. A., Titkov, S. S., Khvostikova, O. A. and Shvarts, M. Z. (2004). *Phys. Semicond. Devices*, 38, 355-359.
16. Posthuma, N. E., Flamand, G. and Poortmans, J. (2003). Development of stand-alone germanium solar cells for application in space using spin-on diffusants. In Photovoltaic Energy Conversion, 2003, Proceedings of 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1, 777-780.
17. Posthuma, N. E., van der Heide, J., Flamand, G. and Poortmans, J. (2004). Development of low cost germanium photovoltaic cells for application in TPV using spin on diffusants. In AIP Conference Proceedings, 738 (1), 337-344.
18. Zhao, L. (2011). High Efficiency Mechanically Stacked Multi-junction Solar Cells for Concentrator Photovoltaics, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.
19. Dold, P. (2003). Czochralski growth of doped germanium with an applied rotating magnetic field. *Cryst. Res. Technol*, 38:7-8, 659–668.
20. Uecker, R. (2014). The historical development of the Czochralski method. *Journal of Crystal Growth*, 401, 7–24.
21. Özen, Y. (2015). III-V Grubu Güneş Hücresi Geliştirilmesi ve Prototip Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik Modül Üretimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
22. Ataşer, T. (2017). İki Eklemlı  $Ga_xIn_{(1-x)}P/GaAs$  Güneş Hücrelerinin Tasarımı, Epitaksiyel Büyütülmeleri ve Hücre Fabrikasyonu, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye.
23. Sertel, T., Ozen, Y., Baran, V. and Ozcelik, S. (2019). Effect of single-layer  $Ta_2O_5$  and double-layer  $SiO_2/Ta_2O_5$  anti-reflective coatings on  $GaInP/GaAs/Ge$  triple-junction solar cell performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 806, 439-450.
24. Zhao, L., Flamand, G., Mols, Y., van der Heide, J. and Poortmans, J. (2010). Novel Mechanically Stacked Multi-junction Solar Cells Applying Ultra-thin III-V Cells and Wafer Based Germanium Cell. *ECS Transactions*, 27(1), 1123-1128.
25. Ponce-Alcántara, S., Connolly, J. P., Sánchez, G., Míguez, J. M., Hoffmann, V. and Ordás, R. (2014). A statistical analysis of the temperature coefficients of industrial silicon solar cells. *Energy Procedia*, 55, 578-588.
26. Liu, L., Chen, N., Bai, Y., Cui, M., Zhang, H., Gao, F., Yin, Z. and Zhang, X. (2009). Quantum efficiency and temperature coefficients of  $GaInP/GaAs$  dual-junction solar cell. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(5), 1176-1180.

27. Min, C., Nuofu, C., Xiaoli, Y. and Han, Z. (2012). Fabrication and temperature dependence of a GaInP/GaAs/Ge tandem solar cell. *Journal of Semiconductors*, 33(2), 024006.
28. Singh, P. and Ravindra, N. M. (2012). Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101, 36-45.
29. Da, Y. and Xuan, Y. (2015). Effect of temperature on performance of nanostructured silicon thin-film solar cells. *Solar Energy*, 115, 109-119.
30. Singh, P., Singh, S. N., Lal, M. and Husain, M. (2008). Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(12), 1611-1616.
31. Feteha, M. Y. and Eldallal, G. M. (2003). The effects of temperature and light concentration on the GaInP/GaAs multijunction solar cell's performance. *Renewable Energy*, 28(7), 1097-1104.
32. Braun, A., Katz, E. A. and Gordon, J. M. (2013). Basic aspects of the temperature coefficients of concentrator solar cell performance parameters. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(5), 1087-1094.
33. Dubey, S., Sarvaiya, J. N. and Seshadri, B. (2013). Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world—a review. *Energy Procedia*, 33, 311-321.
34. Wang, Z., Zhang, H., Zhao, W., Zhou, Z. and Chen, M. (2015). The effect of concentrated light intensity on temperature coefficient of the InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell. *The Open Fuels and Energy Science Journal*, 8(1), 106-111.
35. Wysocki, J. J. and Rappaport, P. (1960). Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion. *Journal of Applied Physics*, 31(3), 571-578.
36. Jeng, M. J., Lee, Y. L. and Chang, L. B. (2009). Temperature dependences of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  multiple quantum well solar cells. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(10), 105101.
37. Steiner, M. A., Geisz, J. F., Friedman, D. J., Olavarria, W. J., Duda, A. and Moriarty, T. E. (2011). Temperature-dependent measurements of an inverted metamorphic multijunction (IMM) solar cell. In Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2011 37th IEEE (2011), 002527-002532.
38. Fan, J. C. (1986). Theoretical temperature dependence of solar cell parameters. *Solar cells*, 17(2-3), 309-315.
39. Green, M. A. (2003). General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 11(5), 333-340.
40. Kinsey, G. S., Hebert, P., Barbour, K. E., Krut, D. D., Cotal, H. L. and Sherif, R. A. (2008). Concentrator multijunction solar cell characteristics under variable intensity and temperature. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 16(6), 503-508.

41. Cuce, E., Cuce, P. M. and Bali, T. (2013). An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*, 111, 374-382.
42. Meneses-Rodríguez, D., Horley, P. P., Gonzalez-Hernandez, J., Vorobiev, Y. V. and Gorley, P. N. (2005). Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. *Solar Energy*, 78(2) 243-250.
43. Castañer, L. and Silvestre, S. (2002). *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice*. England: John Wiley and Sons Ltd, 19-41.
44. Rudolph, P. (2015). *Handbook of Crystal Growth: Bulk Crystal Growth: Basic Techniques (Part A)- Growth Mechanisms and Dynamics (Part B)* (Second Edition). Elsevier, 45-104.
45. Jürgen Buschow, K. H., Cahn, R.W., Flemings, M. C., Ilschner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S. and Veysière, P. (2001). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, 1866-1873.
46. Kolesnikov, N. (2012). *Modern Aspects of Bulk Crystal and Thin Film Preparation* (First Edition). InTech, 43-70.
47. Doering, R. and Nishi, Y. (2008). *Handbook of semiconductor manufacturing technology* (Second Edition). USA: CRC Press, Chapter 3:1-71.
48. Jürgen Buschow, K. H., Cahn, R.W., Flemings, M. C., Ilschner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S. and Veysière, P. (2001). *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. Elsevier, 3507-3517.
49. He, J. (2002). Segregation Control In Czochralski Crystal Growth, PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, 6-22.
50. Depuydt, B., Theuwis, A. and Romandic, I. (2006). Germanium: From the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers. *Materials Science In Semiconductor Processing*, 9, 437-443.
51. Duffar, T. (2010). *Crystal Growth Processes Based on Capillarity: Czochralski, Floating Zone, Shaping and Crucible Techniques* (First Edition). United Kingdom: John Wiley and Sons Ltd, 115-202.
52. Shimura, F. (1989). *Semiconductor silicon crystal technology*. USA: Academic Press Inc., 114-214.
53. Wang, G., Guan, Y., Mei, H., Mei, D., Yang, G., Govani, J. and Khizar, M. (2014). Dislocation density control in high-purity germanium crystal growth. *Journal of Crystal Growth*, 393, 54-58.
54. Aydoğan, Ş. (2011). *Katthal Fiziği* (Birinci Basım). Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti., 465-501.
55. Ryu, J. W. and Jeong, Y. G. (2012). Methods for producing single crystal silicon ingots with reduced incidence of dislocations. Patent Appl. No.: 13/454,676.

56. Erol, A. ve Balkan, N. (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamalar* (İkinci Baskı). Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 191-228.
57. Würfel, P. and Würfel, U. (2016). *Physics of Solar Cells* (Third Edition). Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, 11-40.
58. Herron, J.A., Kim, J., Upadhye, A.A., Huber, G.W. and Maravelias, C.T. (2015). A general framework for the assessment of solar fuel technologies. *Energy&Environmental Science*, 8(1), 126-157.
59. İnternet: Standard Solar Spectra.  
<https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>.
60. Sharp, J. R. (2016). Investigation of single crystal germanium pn-junctions for use in tandem CdTe/Ge solar cells, PhD Thesis, B.E. (Hons), University of Melbourne, Melbourne, Australia.
61. Wang, Y. (2016). Fabrication of Cu<sub>2</sub>ZnSnSe<sub>4</sub> Thin-film Solar Cells by a Two-stage Process, PhD Thesis, University of South Florida, South Florida, USA.
62. Prabhakar, T. (2013). Study of Earth Abundant TCO and Absorber Materials for Photovoltaic Applications, PhD Thesis, The University of Toledo, Ohio, USA.
63. Akçay, N. (2017). Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> İnce Film Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
64. Aydoğan, Ş. (2011). *Katıhal Fiziği* (Birinci Basım). Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti., 305-337.
65. Tüzemen, S. ve Tekmen, S. (2011). *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği* (Birinci Basım). Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 95-138.
66. Altamura, G. (2014). Development of CZTSSe Thin Films Based Solar Cells, PhD Thesis, Université de Grenoble, France.
67. Abusnina, M. M. A. (2016). Synthesis and Characterization of Kesterite Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) Thin Films for Solar Cell Application, PhD Thesis, University of Denver, USA, 12-14.
68. Gangam, S. (2012). Optical Investigations of Cd Free Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> Solar Cells, Master of Science Degree Thesis, The University of Toledo, Ohio, USA.
69. Rajeshmon, G., V. (2013). Prospects of sprayed CZTS thin film solar cells from the perspective of material characterization and device performance, PhD Thesis, Cochin University of Science and Technology, Kerala, India.
70. Pethe, S. A. (2010). Optimization of process parameters for reduced thickness CIGSeS thin film solar cells, PhD Thesis, University of Central Florida, Orlando, Florida, USA.
71. Aydoğan, Ş. (2015). *Katıhal Elektroniği* (Birinci Basım). Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 191-230.

72. Rasmussen, L. C. (2013). Evaluation of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  Absorber Films Sputtered from a Single, Quaternary Target, PhD Thesis, Uppsala Universitet, Sweden.
73. Hodges, D. R. (2009). Development of CdTe Thin Film Solar Cells on Flexible Foil Substrates, PhD Thesis, University of South Florida, South Florida, USA.
74. Guijiang, L., Jyhchiang, W. and Meichun, H. (2010). Theoretical modeling of the interface recombination effect on the performance of III-V tandem solar cells. *Journal of Semiconductors*, 31(8), 082004.
75. Kurtz, S. R., Faine, P. and Olson, J. M. (1990). Modeling of two-junction, series-connected tandem solar cells using top-cell thickness as an adjustable parameter. *Journal of Applied Physics*, 68, 1890-1895.
76. Han, Z., Nuofu, C., Yu, W., Zhigang, Y., Xingwang, Z., Huiwei, S., Yanshuo W. and Tianmao H. (2010). Design and optimization of a monolithic GaInP/GaInAs tandem solar cell. *Journal of Semiconductors*, 31(8), 084009.
77. Castañer, L. and Silvestre, S. (2002). *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice*. England: John Wiley and Sons Ltd, 41-77.
78. Flammersberger, H. (2010). Experimental study of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films for solar cells, Uppsala Universitet.
79. Qi, B. and Wang, J. (2013). Fill factor in organic solar cells. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15, 8972-8982.
80. Aydoğan, Ő. (2011). *Katıhal Fiziği* (Birinci Basım). T¼rkiye: Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti., 189-219.
81. Erol, A. ve Balkan, N. (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamalar* (İkinci Baskı). T¼rkiye: Seçkin Yayıncılık, 229-257.
82. İnternet: Ioffe, Semicond. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>.
83. Akın, N. (2015). ZnO Tabanlı UV Dedekt¼r Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstit¼s¼, Ankara, T¼rkiye.
84. LiŐesivdin, S.B. (2008). AlGaIn/GaN Temelli Y¼ksek Elektron Hareketlilikli Transist¼rlerin (HEMT) Elektron ve Manyeto İletim Özellikleri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstit¼s¼, Ankara, T¼rkiye.
85. Tunay TaŐlı, P. (2010). InAlIn/GaN Temelli Y¼ksek Elektron Mobiliteli Transist¼rlerin (HEMT) Elektron ve Magneto İletim Özellikleri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstit¼s¼, Ankara, T¼rkiye.
86. Khvostikov, V. P., Khvostikova, O. A., Gazaryan, P. Y., Sorokina, S. V., Potapovich, N. S., Malevskaya, A. V., Kaluzhniy, N. A., Shvarts, M. Z. and Andreev, V. M. (2007). Photovoltaic Cells Based on GaSb and Ge for Solar and Thermophotovoltaic Applications. *Journal of Solar Energy Engineering*, 129, 291-297.

87. Posthuma, N. E., Flamand, G., Geens, W. and Poortmans, J. (2005). Surface passivation for germanium photovoltaic cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 88, 37–45.
88. van der Heide, J., Posthuma, N. E., Flamand, G., Geens, W. and Poortmans, J. (2009). Cost-efficient thermophotovoltaic cells based on germanium substrates. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(10), 1810-1816.
89. Tüzemen, S. ve Tekmen, S. (2011). *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği* (Birinci Basım). Türkiye: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 73-93.
90. Aydoğan, Ş. (2011). *Kathal Fiziği* (Birinci Basım). Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım Tic. Ltd. Şti., 265-281.
91. Swain, B. P., Takato, H. and Sakata, I. (2009). Wet Chemical Surface Passivation of Germanium Wafers by Quinhydrone–Methanol Treatment for Minority Carrier Lifetime Measurements. *Applied Physics Express*, 2, 105501.
92. Swain, B. P., Takato, H. and Sakata, I. (2011). Passivation of Germanium Surfaces by a Quinhydrone–Methanol Solution Treatment. *Japanese Journal of Applied Physics*, 50, 071302.
93. Pugazhenthii, C. and Vigneshwaran, A. (2014). Role of surface recombination in multi-crystalline silicon solar cells. *IOSR Journal of Applied Physics*, 6(2), 7-10.
94. Yoon, W., Boercker, J. E., Lumb, M. P., Placencia, D., Foos, E. E. and Tischler, J. G. (2013). Enhanced Open-Circuit Voltage of PbS Nanocrystal Quantum Dot Solar Cells. *Scientific Reports*, 3, 2225.
95. Schmidt, J., Kerr, M. and Cuevas, A. (2001). Surface passivation of silicon solar cells using plasma-enhanced chemical-vapour-deposited SiN films and thin thermal SiO<sub>2</sub>/plasma SiN stacks. *Semiconductor Science and Technology*, 16, 164-170.
96. Bashiri, H., Karami, M. A. and Nejad, S. M. (2014). Crystalline Silicon Solar Cell Engineering to Improve Fill Factor, Open Circuit Voltage, Short Circuit Current and Overall Cell Efficiency. *Modares Journal of Electrical Engineering*, 14(4), 6-14.
97. Augusto, A., Herasimenka, S. Y., King, R. R., Bowden, S. G. and Honsberg, C. (2017). Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-voltage offset. *Journal of Applied Physics*, 121, 205704.
98. Dupré, O., Vaillon, R. and Green, M. A. (2017). *Thermal Behavior of Photovoltaic Devices: Physics and Engineering*, Springer, Hardcover, 29-74.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BARAN, Veysel  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi, yeri : 13.06.1989, Yozgat  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (554) 125 70 58  
 e-mail : veyselbrn@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / FİZİK	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / FİZİK	2014
Lisans	Pamukkale Üniversitesi / FİZİK	2011
Lise	Sorgun Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2006

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	ASELSAN HASSAS OPTİK SAN. VE TİC. A.Ş.	Optik İmalat Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Baran, V., Cat, Y., Sertel, T., Ataser, T., Sonmez, N. A., Cakmak, M. and Ozcelik, S. (2020). A Comprehensive Study on a Stand-Alone Germanium (Ge) Solar Cell. *Journal of Electronic Materials*, 49(2), 1249-1256.
2. Sertel, T., Ozen, Y., Baran, V. and Ozcelik, S. (2019). Effect of Single-Layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Double-Layer SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Anti-Reflective Coatings on GaInP/GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cell Performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 806, 439-450.

3. Çat, Y., Baran, V. and Özçelik, S. (2019). EMI Shielding Effectiveness and Heater Behavior For Ge IR Windows. *Physica Status Solidi A-Applications and Materials Science*, 216(14), 1900005.
4. Çat, Y., Baran, V., Afacan, G., Coşar, M. B. and Özçelik, S. (2018). Investigation of Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of CZ Grown Ge Optical Windows. *Crystal Research and Technology*, 53(8), 1800069.
5. Asar, T., Baran, V., Kurtuluş, G., Dönmez, M. and Özçelik, S. (2018). Platinum Doping Effect on In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MSM IR Photodetectors. *Superlattices and Microstructures*, 122, 650-660.
6. Boyalı, E., Baran, V., Asar, T., Özçelik, S. and Kasap, M. (2017). Temperature Dependent Electron Transport Properties of Degenerate SnO<sub>2</sub> Thin Films. *Journal of Alloys and Compounds*, 692, 119-123.

### Ulusal ve Uluslararası Tebliğler

1. Baran, V., Akcay, N. and Ozcelik, S. (2018). The Study on Defects in Cu:ZnO Thin Film Deposited by Co-Sputtering Technique. 1<sup>st</sup> Light and Light-Based Technologies Workshop, Gazi University. Ankara, Turkey.
2. Karaca, A., Çat, Y., Baran, V., Sağlam, S., Özçelik, S. (2018). MWIR Bölgesi İçin Yansımaya Önleyici İnce Film Kaplama/Anti-Reflection Thin Film Coating For MWIR Region. 1<sup>st</sup> Light and Light-Based Technologies Workshop, Gazi University. Ankara, Turkey.
3. Baran, V., Çat, Y., Akın Sönmez, N., Özen, Y. Kasap, M., Özçelik, S. (2017). The Study on Antimony Diffusion in Gallium-Doped Germanium Grown by Czochralski Technique. Turkish Physical Society 33<sup>rd</sup> International Physics Congress. Bodrum, Turkey.
4. Cat, Y., Baran, V., Karaca, A., Baskose, C., Ozcelik, S. (2017). Metallic Mesh Structure and IR Optical Transmittance. Turkish Physical Society 33<sup>rd</sup> International Physics Congress. Bodrum, Turkey.
5. Akpınar, O., Özen, Y., Gültekin, A., Durmaz, Y., Baran, V., Öztürk, M.K. and Özçelik, S. (2017). Testing Au, Ti and ZnMnO Metal and Alloys on Ge As a Buffer Layer For Opto-Electronic Devices. Turkish Physical Society 33<sup>rd</sup> International Physics Congress. Bodrum, Turkey.
6. Özkök, Y., Akın Sönmez, N., Baran, V., Öztürk, M.K., Çakmak, M., Özçelik, S. (2017). Reaktif Püskürtme Yöntemiyle Elde Edilen TiN ve TiN<sub>x</sub>O<sub>y</sub> İnce Filmlerin Yapısal ve Elektriksel Özellikleri. 23. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
7. Baran, V., Çat, Y., Boyalı, E., Asar, T., Kasap, M. and Özçelik, S. (2016). Sb Doping Effect on the Electrical Properties of Germanium Single Crystals. 2<sup>nd</sup> International Congress on The World of Technology and Advanced Materials. Kırşehir, Turkey.

8. Çat, Y., Baran, V., Kasap, M. ve Özçelik, S. (2016). Germanyum Kızıl Ötesi Optik Pencereler ve Elektromanyetik Girişim. 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Ankara Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
9. Başköse, Ü.C., Çat, Y., Baran, V., Sağlam, S. ve Özçelik, S. (2016). Au/Cr İnce Filmlerin Elektro-Optik, Yapısal ve Morfolojik Özelliklerinin Termal Etkiler Açısından İncelenmesi. 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Ankara Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
10. Baran, V., Çat, Y., Asar, T., Çetin, S.Ş., Kasap, M. ve Özçelik, S. (2015). Sb Katkılı Hacimli Germanyum Tek Kristal Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. 21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Gazi Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
11. Asar, T., Çat, Y., Baran, V. ve Özçelik, S. (2015). a-Ge/c-Ge İnce Filmlerin Üretimi, Yapısal ve Elektriksel Karakterizasyonu. 21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Gazi Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
12. Asar, T., Sertel, T., Korkmaz, B., Özen, Y., Efker, H.İ., Baran, V., Çat, Y., Kurtuluş G. ve Özçelik, S. (2014). Germanyum Alttaş Üretimi: İlk Çalışmalar. 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Hacettepe Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
13. Çat, Y., Baran, V., Ü. Başköse, C., Asar, T., Kurtuluş, G., S. Çetin, Ş. ve Özçelik, S. (2014). Katkısız Germanyum Tek Kristal Büyütülmesi ve Yapısal-Optik Karakterizasyonu. 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Hacettepe Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
14. Baran, V., Çat, Y., Boyalı, E., Asar, T., Kasap, M. ve Özçelik, S. (2014). Antimon (Sb) Katkılı Germanyum (Ge) Hacimli Tek-Kristalinin Büyütülmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu. 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Hacettepe Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
15. Baran, V., Boyalı, E., Çat, Y., Kasap, M. ve Özçelik, S. (2013). Katkısız Ge Tek-Kristal Yarıiletkeninin Büyütülmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu. 19. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Bilkent Üniversitesi. Ankara, Türkiye.
16. Çat, Y., Baran, V., Asar, T., Çetin, S.Ş., Memmedli, T., Özçelik, S. (2013). Hacimli Tek Kristal Ge Büyütülmesi ve Optik Karakterizasyonu. 19. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Bilkent Üniversitesi. Ankara, Türkiye.

### **Dereceler**

1. Baran, V., Çat, Y., Kasap, M., Özçelik, S. (2014). Kızılötesi Görüntüleme Sistemleri İçin Germanyum Mercek Geliştirilmesi. Gazi Üniversitesi II. Bilim Günleri Proje Pazarı Yarışması-Birincilik, Gazi Üniversitesi. Ankara, Türkiye.

### **Hobiler**

Spor, Seyehat ve Doğa Yürüyüşü





*GAZİ GELECEKTİR..*